لجنة التأليف والترجمة والنشر سنة ١٩١٤

النظرية النسبية الخاصة

تأليف
الدكتور
علي مصطفي مشرفة بك

أستاذ الرياضيات التطبيقية وعميد كلية العلوم
بجامعة فؤاد الأول

القاهرة
مطبعة لجنة التأليف والترجمة والنشر
١٣٦٤ هـ - ١٩٤٥ م

(مقدمة)

في ربيع سنة ١٩٤٤ طلبت إليّ وزارة المعارف العمومية أن ألقي بعض محاضرات بمعهد الدراسات العليا الليلي على حضرات أساتذة المدارس الثانوية في موضوع النسبية الخاصة .

وقد رأيت أن أجمع مادة هذه المحاضرات في هذه الرسالة لعلها تكون عونا لقراء العربية على تفهم الآراء والمبادئ التي تنطوي عليها هذه النظرية الهامة .

وقد رأيت أن أعرض النظرية عرضا منطقيا متصلا دون التعرض للبراهين الرياضية بحيث يجيء هذا الجزء خلوا من الرموز والمعادلات على قدر الإمكان ، ووضعت البراهين الرياضية ذاتها في ذيول مرتبة في الجزء الأخير من الرسالة ، ولي في ذلك غرضان ؛ الأول أن يتاح لغير الرياضيين من القراء متابعة التفكير العلمي في الرسالة دون أن تعكر عليهم صفوهم رؤية الرموز والمعادلات ، والغرض الثاني أن يتمكن الرياضيون أنفسهم من الإلمام بالناحيتين المنطقية والفلسفية للموضوع ،

وإنني أقدم خالص شكري إلي حضرة الأستاذ حسن بهجت نجاتي على معاونته لي في تحرير أصول هذا الكتاب وفي تصحيح تجارب الطبع .

الباب الأول
منشأ النظرية النسبية

*** النظرية النسبية كرأي علمي :**

النظرية النسبية هي مجموعة من الآراء والحقائق العلمية نشأت كنتيجة لتطور العلوم الرياضية والطبيعية في أواخر القرن الماضي وأوائل القرن الحالي . وشأن النظرية النسبية شأن أية نظرية علمية أخرى فهي أقوال يراد بها تفسير حقائق . وإذن فأساسها الحقائق المحسوسة الملموسة فليست النظريات العلمية نوعا من الحدس والتخمين وليست ضربا من ضروب التكهن .

والنظريات العلمية ضرورة من ضرورات تقدم العلم . فالحقائق التي نصل إليها عن طريق التجارب العلمية أو عن طريق المشاهدة لا يمكن أن نتركها مبعثرة غير متماسكة بل إن الفكر البشري يدأب علي الجمع بينها ولم شعثها في نظام واحد متناسق يربط أجزائها ويجعل منها وحدة متصلة من التفكير . هذه الوحدة المتصلة من الحقائق هي ما يسمي بالنظرية العلمية . والنظرية العلمية في تطور مستمر فهي تنمو بنمو المعرفة البشرية وترتقي بارتقائها . وبعض النظريات العلمية لا يعدوا أن يكون رأيا أو قولا معدلا لما سبقه من الآراء والأقوال العلمية بحيث لا يميزه عنها إلا العلماء المتخصصون والبعض الآخر من النظريات العلمية له صفة انقلابية تسترعي النظر ويسهل إدراكها لغير المتخصصين . فالقول الذي قال به (كوبرنيك) في القرن السادس عشر أن الأرض والكواكب تدور حول الشمس لا يعدو أن يكون نظرية علمية . إلا أن صفته الانقلابية واضحة للعيان فهو فاتحة عصر جديد في تطور العلوم الفلكية . والقول الذي قال به (دالتون) وأتباعه في القرن التاسع عشر بأن المواد التي تقع تحت الحس كلها مؤلف من ذرات لا يعدو أن يكون نظرية علمية أيضا . ومع ذلك فهو أساس علم الكيمياء .

* **النظرية النسبية نظرية انقلابية :**

ولا تقل النظرية النسبية عن نظرية (كوبرنيك) ولا عن نظرية (دالتون) في أهميتها الانقلابية فهي تعتبر بحق فاتحة عصر جديد في تطور العلوم الرياضية والطبيعية والفلكية ، بل وفي تطور الفكر الفلسفي ذاته .

وتعد آراء (كوبرنيك) آراء انقلابية في التفكير البشري لأنه طلب إلي البشر أن يعدلوا عما كانوا يظنونه بديهيا وأن ينظروا إلي العالم من وجهة نظر جديدة لم يألفوها . ولم يكن من السهل عليهم أن يتعودوها ، فالفكر البشري يسلم ببعض القضايا علي أنها بديهية لا تحتاج إلي إثبات فهي بسيطة كل البساطة أساسية إلي أبعد الحدود بحيث لا يتصور أن يختلف فيها اثنان . هذه المسائل التي تبدو بديهية هي التي يطلب أمثال (كوبرنيك) و (أينشتين) من الناس أن يبحثوا فيها وأن يصلوا من بحثها إلي قلب أوضاعها رأسا علي عقب بحيث يصبح خطأً ما كان بديهيا وبحيث يسلم العقل بما لم يكن يتصور التسليم به من قبل .

فكوبرنيك قد طلب إلي علماء الفلك وإلي المفكرين عموما أن يقلعوا عن عاداتهم الموروثة من النظر إلي العالم من وجهة نظر سكان الأرض ، وهو طلب يكاد يكون مستحيلا إذ كيف ينظر الناس إلي العالم من مكان غير الأرض التي يسكنونها ويعيشون عليها ؟ فلا عجب أن لقيت آراء (كوبرنيك) ما لقيت من مقاومة عنيفة ولا عجب إذا قاومتها الكنيسة وقاومها العقلاء والمتزنون من أهل الفكر في عصره فهي ولا شك في نظرهم بدعة من البدع بل هي زندقة تمت إلي الكفر بسبب .

وإذا سئل (كوبرنيك) عن سبب هذه الدعوة الغريبة فإن جوابه جوابه يبدو بسيطا وغريبا في آن واحد . فهو يدعو الناس إلي أن يتخذوا لهم مقاما عند مركز الشمس يصطلون فيه حرارتها وأوارها لكي ينظروا إلي المجموعة الشمسية ، لأنهم إن فعلوا ذلك ظهرت لهم حركات الكواكب بسيطة سهلة غير معقدة فرأوا كل كوكب يتحرك في دائرة أو ما يشبه الدائرة حول الشمس . أما إذا بقي الناس ينظرون إلي الكواكب من مكانهم الطبيعي أو الذي يظهر أنه طبيعي علي سطح المعمورة فإنهم يرون الكواكب تتحرك حركات معقدة في منحنيات (سيكلويدية) و (فوق السيكلويدية) شديدة

الاختلاط بعيدة عن كل نظام ، لا يكاد العقل يدرك صورتها لاضطرابها وارتباك نظامها .

فحجة (كوبرنيك) إذن في كلمة واحدة هي البساطة ، البساطة في التفكير ، والبساطة في وصف الظواهر الطبيعية ، والبساطة في التعليل المنطقي ، ومن أجل هذه البساطة كانت الدعوة إلي الخروج علي ما هو مألوف وموروث . فعلي البشر أن يختاروا إحدى اثنتين ؛ فإما أن يحتفظوا بنظرتهم التقليدية ، وفي هذه الحالة تبقي حركات الكواكب طلاسم معقدة ، وإما أن يلبوا دعوة (كوبرنيك) فينتقلوا بذهنهم وخيالهم إلي مركز الشمس ، وعندئذ تبدوا لهم حركات الكواكب سهلة بعيدة عن كل تعقد . وهم إذا اختاروا أول الأمرين بقوا وبقي العلم في ركود وجمود يترك البشرية حيث هي واقفة في مكانها لا تتحرك ، وإذا اختاروا الأمر الثاني تقدم العلم وفتحت أمام البشرية آفاق جديدة .

٭ بحث أينشتين عام ١٩٠٥ :

وفي عام ١٩٠٥ ظهرت في مجلة علمية ألمانية [١] رسالة للعالم الألماني ألبرت أينشتين (Albert Einstein) موضوعها " الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة " تعرض فيها المؤلف في كثير من التفصيل الفني للإجابة عن السؤال الآتي وهو :

هل يمكن صياغة قوانين الديناميكا الكهربائية بحيث تبقي هذه القوانين محتفظة بصورتها إذا انتقلنا من مكان إلي آخر بفرض أن أحد المكانين متحرك بالنسبة للمكان الآخر ؟

أو بعبارة أخري ، هل يمكن أن تصاغ هذه القوانين الطبيعية الهامة في قالب لا يتأثر شكله بحركة المكان الذي تصاغ فيه ؟

وقوانين الديناميكا الكهربائية هي مجموعة من القوانين الأساسية كشف عنها البحث العلمي في القرنين الماضيين واقترنت بأسماء (أوهم) و (فاراداي) و (كولومب) و (كلارك مكسويل) ، وقد توصل هذا الأخير من النصف الثاني من القرن التاسع عشر إلي وضع هذه القوانين في صورة

---

(١) مجلة (Annalen der Physik) العدد ١٧ .

رياضية متناسقة محبوكة الأطراف تنسب إليه وتقرن باسمه . فيقال معادلات مكسويل للديناميكا الكهربائية .

ولما كان البحث العلمي في القرن الماضي قد هدي الناس إلي أن المادة ما هي إلا كهرباء كما هداهم أيضا إلي أن النور وغيره من الأشعة قوامها الكهرباء أيضا . فإن معادلات مكسويل الكهربائية قد اكتسبت مكانا رئيسيا بين القوانين الطبيعية وصارت أساسا للبحث في المادة وفي الإشعاع معا . وبذلك تغلغلت بين ثنايا الكون وأصبح البحث فيها من صميم الفلسفة الطبيعية .

قلت أن (كلارك مكسويل) قد صاغ قوانين الديناميكا الكهربائية صياغة متناسقة ومع ذلك فقد بقيت نقطة هامة تشغل بال العلماء من أمر هذه القوانين ألا وهي : ما الذي يحدث لهذه القوانين إذا تحركت المجموعة المادية التي تشاهد منها الظواهر الطبيعية ؟ ويمكن وضع هذه المسألة علي النحو الآتي : إن (كلارك مكسويل) كان يجري تجاربه في وقت من الأوقات في معمل من معامل الطبيعة بإنجلترا فإذا فرضنا أن باحثا آخر عنده ما عند كلارك مكسويل من الأجهزة العلمية يجري تجاربه هو أيضا في معمل يشبه معمل كلارك مكسويل ولكنه في مكان آخر علي الأرض أو علي كوكب من الكواكب متحرك بالنسبة لمعمل مكسويل . فهل يصل هذا الباحث إلي نفس المعادلات الرياضية التي وصل إليها مكسويل ؟

إن هذا السؤال يثير مبدأ فلسفيا من أهم المبادئ وأعمقها . هل لقوانين الطبيعية صفة الإطلاق ؟ وهل هي مستقلة عن الزمان والمكان وبالتالي عن الحركة ؟ إننا نعلم أن جزئيات المعرفة البشرية تختلف باختلاف الزمان والمكان وباختلاف الحركة . فهل القوانين الطبيعية ذاتها التي هي قضايا كلية . هل هذه تختلف أيضا باختلاف الحركة . أم إنها مستقلة عنها ؟ إن شعورا داخليا قويا يوحي إلي النفس البشرية أن القوانين يلزم أن تكون مطلقة وأن شكلها يجب أن يبقي كما هو غير متأثر بالزمان والمكان .

بل إن معني القانون الطبيعي ينطوي علي معني التجرد والإطلاق . هكذا فكر علماء الطبيعة في أواخر القرن الماضي وهكذا كان تفكير (أينشتين) عندما نشر رسالته عام ١٩٠٥ في الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة .

* آراء لورنتز :

وكان العلامة الهولندي (لورنتز) قد اهتدي قبل (أينشتين) ببضع سنين إلي وسيلة من شأنها أن تجعل معادلات مكسويل تحتفظ بصورتها الشكلية غير متأثرة بحركة المجموعة المادية التي تنسب إليها . ونشر بحوثه في رسالتين إحداهما طبعت بمدينة ليدن عام ١٨٩٥ والثانية ظهرت في أعمال أكاديمية العلوم بمدينة أمستردام عام ١٩٠٤ . وقد وجد لورنتز أنه من الممكن لمعادلات مكسويل أن تحتفظ بشكلها إزاء حركة المجموعة التي تنسب إليها بشرط استخدام (زمن محلي) و (طول محلي) . فالعلامة مكسويل في معمله بإنجلترا والباحث الثاني في معمله بمكان آخر يمكن أن يتفقا علي شكل واحد للقوانين الطبيعية بشرط أن يختلفا علي معني الزمن ومعني الطول . ولم يتعرض لورنتز لما ينتج عن هذا الاختلاف في معني الزمن ومعني الطول من نتائج علمية بل كان بحثه محصورا في دائرة معادلات مكسويل ذاتها ومنصبا عليها .

* قوانين الطبيعة ومبدأ النسبية :

أما رسالة أينشتين التي أشرنا إليها فقد وضعت البحث العلمي علي أساس جديد . ذلك أن أينشتين وضع مبدأ جديدا جعله نقطة بدايته وسماه مبدأ النسبية . وهو القول بأن القوانين الطبيعية مستقلة عن حركة المجموعة التي تنسب إليها فالمسألة في نظر أينشتين لم تعد مسألة اختراع وسيلة من شأنها أن تحفظ علي معادلات مكسويل صورتها مستقلة عن الحركة بل هي مسألة أعم وأعمق . فمعادلات مكسويل وغيرها من قوانين الطبيعة يلزم أن تكون مستقلة عن الحركة وكل قول لا يفي بهذا الشرط الأساسي لا يكون قانونا طبيعيا بل يلزم تعديله وصياغته صياغة تتفق ومبدأ النسبية . ولا شك في أن هذه الخطوة التي خطاها أينشتين كانت خطوة جريئة بقدر ما جاءت موفقة . فاحتفاظ القوانين الطبيعية بشكلها أو صيغتها مسألة ترتبط بعلم الجمال أكثر منها بعلم الطبيعة . فهي مسألة شكل لا موضوع . وكما أن العين ترتاح إذا نظرت إلي جسم متماثل الشكل متناسب الأجزاء وترتاح لبقاء هذا التناسب إذا نظر إليه من نواح مختلفة . كذلك الفكر البشري يرتاح في احتفاظ القوانين الطبيعية

بشكلها الرياضي واستقلالها عن الزمان والمكان مبعث ارتياح خاص ومظهرا من مظاهر الكمال .

إلا أن مبدأ النسبية لكي يحتفظ لقوانين الطبيعية بكمال صيغتها فإنه لا يفعل ذلك دون تضحيات جسيمة لأول وهلة . فالاتفاق علي قوانين الطبيعة يتبعه اختلاف علي مبادئ كانت تظهر بديهية بحيث لا يختلف فيها اثنان .

*** المعني الفلكي للزمن :**

ما معني حدوث حدث معين في وقت معين ؟ إن الحوادث التي تحدث في مكان واحد يسهل علي من يقيم في هذا المكان أن يرتبها ترتيبا زمنيا من الماضي إلي الحاضر إلي المستقبل . ولكن إذا كانت الحوادث واقعة في أماكن متباعدة فكيف يمكن الحكم علي تعاقبها الزمني ؟

ولنضرب لذلك مثلا . فلنفرض أن عالما فلكيا شاهد خسوف قمر من أقمار المشتري فرأي هذا الخسوف في الساعة الحادية عشر مساءا . إن هذا الفلكي يعلم أن بين الأرض والمشتري مسافة تقدر بملايين الأميال . فالخسوف إذن لم يقع في اللحظة التي رآه فيها الفلكي أي لم يقع في الساعة الحادية عشر بل إنه لا بد قد وقع في لحظة سالفة لذلك ثم انتقل خبره إلي الأرض بسرعة الضوء أي بسرعة تساوي ١٨٦٠٠٠ ميل في الثانية الواحدة . وعلي ذلك فقد مضت بضع دقائق بين وقوع الخسوف ولحظة مشاهدته . ولنفرض أن باحثا فلكيا يعيش علي كوكب آخر من المجموعة الشمسية. إن هذا الباحث سيشاهد الخسوف في لحظة تختلف عن اللحظة التي يشاهده فيها الباحث الأرضي وذلك بقدر اختلاف البعد بين الكوكب الآخر والمشتري عن البعد بين الأرض والمشتري .

هذه هي الطريقة التي كان يستعملها علماء الفلك في تقدير الوقت إلي أوائل القرن الحالي . وأساس هذه الطريقة افتراض أن الحوادث الفلكية مرتبة ترتيبا تعاقبيا بالنسبة إلي زمن مطلق أو زمن عام يشمل الوجود بأسره . ثم إن كل مشاهدة من المشاهدات الفلكية يمكن تحديد زمنها المطلق بعملية حسابية أساسها احتساب الزمن اللازم لانتقال أخبار الحوادث من مكان إلي آخر بسرعة الضوء والشيء الذي أريد أن أؤكده في هذا هو أن

توقيت الحوادث الفلكية ليس نتيجة للمشاهدة المباشرة بل هو نتيجة لعملية حسابية مبنية علي فرض نسلم به دون أن نعني بالبرهنة عليه . فالآراء الفلكية إلي أوائل القرن الحالي كانت تسلم بوجود زمن مطلق يعم فضاء العالمين وتنتظم فيه الحوادث متعاقبة بين الماضي والمستقبل .

ولعل القارئ يعلم أن بعض الأجرام السماوية يصل إلينا ضوئها في ألوف السنين بل وفي ملايين السنين ، وإذن إذا نحن نظرنا إلي السماء في ليلة صافية فإننا لا نري النجوم والأجرام السماوية كما في اللحظة التي ننظر فيها إليها ، فبعضها قد وصل إلينا ضوئه في بضع سنين وإذن فنحن نراها كما كانت منذ بضع سنين وبعضها قد وصل نوره في مئات السنين وإذن فنحن نراها كما كانت عليه حالها منذ مئات السنين ، وبعض الأجرام السماوية مثل (السدوم اللولبية) إنما نراها كما كانت عليه منذ ملايين السنين وهكذا . ومن ذلك يتضح أن القول بوجود زمن مطلق يشمل العالم بأسره يقتضي أن يختلف يقتضي أن يختلف مظهر العالم إذا نظرنا إليه من أماكن مختلفة .

*** هل للزمن معني مطلق ؟**

والسؤال الذي يَعُنُّ للفكر هو الآتي :

إذا رتب مشاهد حوادث الكون ترتيبا تعاقبيا ورتب مشاهد آخر نفس الحوادث ترتيبا تعاقبيا مبنيا علي مشاهدته هو لهذه الحوادث فهل يصل الرجلان إلي ترتيب واحد ؟

وبعبارة أخري : هل للماضي معني الإطلاق ؟ وهل للمستقبل نفس المعني مهما يكن المكان الذي نشاهد منه حوادث العالم ؟

إن علماء الفلك إلي أوائل القرن الحالي كانوا يجيبون عن هذا السؤال بالإيجاب ، وكانوا يعتبرون هذا مسألة بديهية يسلم بها تسليما ، وأظن أن القارئ متفق معي علي أن المسألة ليست بهذه البساطة المتناهية .

فاتفاقنا علي الماضي والمستقبل في دائرة الحوادث التي تحدث علي الكرة الأرضية ربما كان أمرا بسيطا أو بديهيا ، أما اتفاق سكان كوكبين مختلفين علي زمن حادث فلكي يصل خبره إلي كل منهما في ألوف السنين أو ملايينها فمسألة في نظر .

٭ نسبية المكان :

وكما أن لنا أن نشكك في وجود زمان مطلق فإن لنا أيضا أن ننشكك في وجود مكان مطلق . فالبعد بين النقطتين علي سطح الأرض قد يكون حقيقة مطلقة يسهل علي أهل الأرض الاتفاق عليها . ولكن ما معنى البعد بين نجمين يبعد كل منهما عنا بملايين الملايين من الأميال ؟ وهل لنا أن نفترض أن سكان الأرض وسكان كوكب آخر سيتفقان لا محالة علي مقدار هذا البعد ؟

قلتُ إن النظرية النسبية لكي تصل إلي كمال القوانين الطبيعية قد ضحت في سبيل ذلك ببعض المبادئ التي كانت تظهر بديهية . وأهم هذه المبادئ التي وجد من الضروري نقضها والعدول عنها مبدأ القول بالزمان المطلق ومبدأ القول بالمكان المطلق . فأينشتين لكي يحتفظ لقوانين الطبيعة بصورة مطلقة مجردة من الزمان والمكان قد وجد من الضروري أن يسلب كلا من الزمان والمكان استقلاله وإطلاقه بحيث يختلف مشاهدان علي مقدار البعد بين نجمين أو علي الفترة الزمنية بين حادثين .

٭ اتصال الزمان بالمكان :

ومع ذلك فإن أينشتين ومنكفسكي([1]) قد وجدا أنه وإن يكن الزمان وحده نسبيا غير مطلق والمكان وحده نسبيا غير مطلق أيضا إلا أنه من الممكن أن يتكون من مجموعهما حقيقة مطلقة مجردة .

وفي ذلك يقول منكفسكي قوله المأثور في محاضرته التي ألقاها بمدينة كولونيا في سبتمبر عام ١٩٠٨ وهو :

" إن المكان بذاته . وكذلك الزمان بذاته يتحول كل منهما منذ اليوم إلي ظل زائل . وإنما يبقي الوجود المستقل لنوعٍ من الائتلاف بينهما "

([1]) هو الرياضي الألماني (Hermann Minkowski) ١٨٦٤ – ١٩٠٩ ، أحد المشاركين في تطوير مفاهيم النسبية .

* **النسبية العامة والنسبية الخاصة :**

ذكرت أن مبدأ النسبية هو القول باستقلال القوانين الطبيعية عن الحركة ، أي عن حركة من يشاهد الطبيعة ويصوغ قوانينها وبينت أن كلا من لورنتز وأينشتين قد تمكنا من صياغة قوانين الكهرباء بحيث تبقي هذه القوانين مستقلة عن حركة المشاهد . ولكن الحركة التي افترضها أينشتين لم تكن أعم أنواع الحركة بل إنه قصر بحثه علي الحركة المنتظمة والمقصود بالحركة المنتظمة الحركة التي لا تتغير فيها سرعة المتحرك مقدارا ولا اتجاها . والحركة المنتظمة هي أبسط أنواع الحركة .

فأينشتين عام ١٩٠٥ لم يصغ معادلات مكسويل الكهربائية بحيث تكون مستقلة عن الحركة عامة بل عن الحركة المنتظمة خاصة . ولذلك أُطلِق علي نظرية أينشتين التي جاء بها عام ١٩٠٥ اسم (النسبية الخاصة) أو (النسبية المقيدة) وذلك لأنها كانت محدودة في دائرة الحركة المنتظمة خاصة فنشأ عن ذلك تقييد أو تخصيص لمدي البحوث التي تتعرض لها النظرية .

وفي عام ١٩١٥ تمكن أينشتين من فك هذا التقييد وتعدي هذا التخصيص ونشر بحثه عام ١٩١٦ تحت عنوان " أسس النظرية النسبية العامة " في العدد ٤٩ من نفس المجلة ([1]) التي نشر فيها بحثه الأول . فالنسبية العامة محررة من هذا القيد فتنطبق علي الحركة عامة .

والبحث في هذا الكتاب كما يدل عنوانه مقصور علي النسبية الخاصة .

([1]) مجلة (Annalen der Physik) العريقة .

الباب الثاني
سرعة الضوء في الفضاء

كان الإغريق القدماء يتصورون أن الرؤية تحدث بخروج شعاع من العين يلمس الجسم المرئي فيحس الرائي بوجوده . وقد قام العرب بتفنيد هذا الزعم وإثبات أن الشعاع يدخل العين من الجسم المرئي وليس العكس ، وقد بحث العرب ولاسيما (بن الهيثم) قوانين انعكاس الضوء وانكساره فوضعوا أساسا ثابتا لدراسة علم الضوء .

ولم يثبت أن العرب أو الإفرنجة حتى أواخر القرن السابع عشر قد بحثوا في سرعة الضوء أو قاسوا مقدار هذه السرعة .

٭ مشاهدة رومر[1] (Romer) :

وأول من قاس سرعة الضوء الفلكي الدانمركي (رومر) وذلك في عام ١٦٧٥ " انظر الفصل الأول من ذيل الكتاب " فقد شاهد رومر خسوف أقمار المشتري وهو كوكب في المجموعة الشمسية يدور حول الشمس في فلك قطره أكبر من قطر فلك الأرض ، وكما أن للأرض قمرا يدور حولها فللمشتري أقمار تدور حوله منها أربعة أقمار تري بسهولة بمنظار صغير فإذا دخل أحد هذه الأقمار في ظل المشتري خُسِف هذا القمر لعدم وصول نور الشمس إليه .

ولما كان كل واحد من هذه الأقمار يدور حول المشتري بحيث يتم دورة كاملة في زمن معين فإن خسوف هذا القمر يجب أن يحدث في فترات منتظمة بحيث تكون الفترة بين خسوف والذي يليه مساوية الفترة التالية أي التي بين هذا الخسوف الأخير والخسوف الذي يليه وهكذا . ولكن رومر شاهد أن هذه الفترات الواقعة بين أوقات الخسوف كما تري من الأرض غير منتظمة فهي تتناقص إذا كانت الأرض تقترب من المشتري وتتزايد إذا كانت الأرض تبتعد عنه . وقد علل رومر هذه الظاهرة تعليلا صحيحا فنسبها إلي أن الضوء

([1]) الفلكي الدانمركي أولا كرستنين رومر (**Ole Christensen Rømer**) مواليد ١٦٤٤ وتوفي ١٧١٠ .

يتحرك بسرعة محدودة في الفضاء فاللحظة التي نشاهد فيها خسوف قمر المشتري غير اللحظة التي حدث فيها فعلا والفرق بينهما هو الزمن اللازم للضوء لكي يقطع المسافة بين المشتري إلي الأرض . ولما كانت هذه المسافة متغيرة بسبب حركة كل من الأرض والمشتري حول الشمس ، فمن ذلك ينشأ تفاوت في طول الفترة بين خسوفين متتالين .

وقد قام (رومر) فعلا بحساب سرعة الضوء من مشاهدته هذه الظاهرة فقدَّر لها أكثر بقليل من قيمتها الحقيقية وهي نحو ١٨٦ ألف ميل في الثانية وهو ما يعادل نحو ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية الواحدة([1]).

*** مشاهدة برادلي للزيغ الفلكي :**

وفي عام ١٧٢٦ شاهد الفلكي الإنجليزي (برادلي)([2]) ظاهرة أخري مكنته من قياس سرعة الضوء في الفضاء ، فقد لاحظ أن مواقع النجوم التي تعرف بالثابتة تتغير تغيرا سنويا " انظر الفصل الثاني من ذيل هذا الكتاب " بحيث يرسم موقع كل نجم علي وجه العموم قطعا ناقصا صغيرا في السماء .

وقد علل برادلي هذه الظاهرة تعليلا صحيحا بأن قال إن الموقع الظاهري للنجم يتوقف علي سرعة الأرض في مدارها حول الشمس بمثل ما تتوقف علي سرعة القطار زاوية نزول المطر التي ترسمها قطراته علي زجاج قطار متحرك . فلو فرضنا أن المطر يهطل في اتجاه رأسي علي الأرض فإن آثار قطراته علي زجاج النافذة لا تكون خطوطا رأسية بل تكون خطوطا مائلة يزداد ميلها علي الاتجاه الرأسي بازدياد سرعة القطار ، وكذلك الأشعة الواصلة إلينا من النجم فإن ميلها يتوقف علي حركة الأرض .

وقد تمكن (برادلي) من قياس سرعة الضوء قياسا مبنيا علي مشاهدته الفلكية فوجد هذه السرعة مساوية للسرعة التي وجدها (رومر) قبله ، وتعرف ظاهرة برادلي هذه بظاهرة الزيغ الفلكي ، وسيأتي الكلام عنها فيما بعد .

([1]) طبقا لموسوعة الويكيبيديا فإن رومر استنتج سرعة الضوء بمقدار ٢٢٠ ألف كيلومتر في الثانية الواحدة .

([2]) الفلكي الانجليزي جيمس برادلي (James Bradley) توفي في الثالث عشر من يوليو عام ١٧٦٢ م .

ومن الطريف أن مشاهدات رومر هي التي نعتبرها الآن فاتحة عصر جديد في دراسة العلوم الطبيعية والفلكية ، أن هذه المشاهدات لم يؤبه لها في حينها بل ألقيت في زوايا النسيان حتي جاء برادلي فاستلفت نظر العلماء إليها .

* تجربة فيزو :

وفي عام ١٨٤٩ قام (فيزو) [1] لأول مرة بإجراء تجربة أرضية (أي غير فلكية) لقياس سرعة الضوء ، وقد استخدم لذلك جهازا يدل علي براعته وسعة حيلته ، ويتركب الجزء الرئيسي من الجهاز من عجلة مسننة تدور حول محورها ويمر الضوء في الفتحة الواقعة بين سنتين من أسنانها ثم ينعكس علي مرآة ترده إلي نفس النقطة التي بدأ منها ، وكانت العجلة في تجربة فيزو تحتوي علي ٧٢٠ سنا متساوية الأبعاد ، وكانت المسافة بين العجلة والمرآة العاكسة ٨,٦ من الكيلومترات ، فإذا دارت العجلة بحيث يكون الزمن الذي يقطع فيه الضوء هذه المسافة ذهابا وإيابا مساويا للزمن الذي يحل فيه سن من أسنان العجلة محل الفتحة الواقعة بين هذا السن والسن الذي قبله ، إذا تساوي هذان الزمنان فإن الضوء الذي مر من الفتحة ثم انعكس عن المرآة يجد عند عودته سنا يقف في سبيله ويحول دون رؤية العين له ، وبذلك تظهر المرآة مظلمة .

وقد استخدم كورنو[2] عام ١٨٧٤ ، وكذلك ينج[3] وفوربز[4] عام ١٨٨١ ، وبيروتان[5] عام ١٩٠٠ طريقة فيزو لقياس سرعة الضوء مع بعض التحسين في هذه الطريقة فوصلوا جميعا إلي تقدير سرعة الضوء بنحو ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية وكانت نتيجة بيروتان ٢٩٩,٨٦ ألف كيلومتر في الثانية .

---

(1) الفيزياء الفرنسي أرمان هيبولي لويس فيزو (**Armand Hippolyte Louis Fizeau**) توفي عام ١٨٩٦ .
(2) الفيزيائي الفرنسي ماري ألفريد كورنو (**Marie Alfred Cornu**) توفي في الثاني عشر من إبريل عام ١٩٠٢ .
(3) الكيميائي الاسكتلندي جيمس ينج (**James Young**) ، ولد ١٣ يوليو ١٨١١ وتوفي في ١٣ مايو سنة ١٨٨٣ م .
(4) المهندس العبقري والفلكي والمستكشف البروفيسور جورج فوربز (**George Forbes**) وفيات سنة ١٩٣٦ م .
(5) الفلكي الفرنسي هنري جوزيف أنستاس بيروتان (**Joseph Perrotin**) توفي في ٢٤ فبراير سنة ١٩٠٤ م .

* تجربة فوكو :

وفي عام ١٩٦٣ استخدم فوكو([1]) جهازا مستحدثا لقياس سرعة الضوء بواسطة مرآة تدور حول محور ثابت وأحلّ هذه المرآة محل العجلة المسننة في طريقة فيزو وينشأ عن دوران هذه المرآة أن الضوء الذي ينعكس عنها وعن المرآة الثابتة لا يعود إلي نفس النقطة التي بدأ منها ، وبعبارة أخري تنتقل الصورة الضوئية مسافة يتوقف مقدارها علي سرعة دوران المرآة ، وميزة طريقة فوكو إمكان إجرائها في حيز صغير فالمسافة بين المرآتين في تجربة فوكو كانت عشرين مترا مقابل ٨،٦ كيلومتر في تجربة فيزو .

وقد أعاد نيكلسن (Nicholson) عام ١٨٨٢ تجربة فوكو مع بعض التحسينات في الطريقة فوصل إلي تقدير سرعة الضوء بمقدار ٢٩٩،٨٥ ألف كيلومتر في الثانية .

ويستطيع القارئ أن يرجع إلي كتب الطبيعة الابتدائية ليقف علي وصف الأجهزة التي استخدمها فيزو وفوكو لقياس سرعة الضوء فأمرها شائع معروف لتلاميذ المدارس الثانوية .

([1]) الفيزيائي الفرنسي جان برنار ليو فوكو (**Jean Bernard Léon Foucault**) وفيات فبراير سنة ١٨٦٨ م .

الباب الثاني

سرعة الضوء في الفضاء

كان الإغريق القدماء يتصورون أن الرؤية تحدث بخروج شعاع من العين يلمس الجسم المرئي فيحس الرائي بوجوده . وقد قام العرب بتفنيد هذا الزعم وإثبات أن الشعاع يدخل العين من الجسم المرئي وليس العكس . وقد بحث العرب ولاسيما (بن الهيثم) قوانين انعكاس الضوء وانكساره فوضعوا أساسا ثابتا لدراسة علم الضوء .

ولم يثبت أن العرب أو الإفرنجة حتى أواخر القرن السابع عشر قد بحثوا في سرعة الضوء أو قاسوا مقدار هذه السرعة .

⋆ مشاهدة رومر[1] (Romer) :

وأول من قاس سرعة الضوء الفلكي الدانمركي (رومر) وذلك في عام ١٦٧٥ " انظر الفصل الأول من ذيل الكتاب " فقد شاهد رومر خسوف أقمار المشتري وهو كوكب في المجموعة الشمسية يدور حول الشمس في فلك قطره أكبر من قطر فلك الأرض . وكما أن للأرض قمرا يدور حولها فللمشتري أقمار تدور حوله منها أربعة أقمار تري بسهولة بمنظار صغير فإذا دخل أحد هذه الأقمار في ظل المشتري خُسِف هذا القمر لعدم وصول نور الشمس إليه .

ولما كان كل واحد من هذه الأقمار يدور حول المشتري بحيث يتم دورة كاملة في زمن معين فإن خسوف هذا القمر يجب أن يحدث في فترات منتظمة بحيث تكون الفترة بين خسوف والذي يليه مساوية الفترة التالية أي التي بين هذا الخسوف الأخير والخسوف الذي يليه وهكذا . ولكن رومر شاهد أن هذه الفترات الواقعة بين أوقات الخسوف كما تري من الأرض غير منتظمة فهي تتناقص إذا كانت الأرض تقترب من المشتري وتتزايد إذا كانت الأرض تبتعد عنه . وقد علل رومر هذه الظاهرة تعليلا صحيحا فنسبها إلي أن الضوء

([1]) الفلكي الدانمركي أولا كرستتين رومر (**Ole Christensen Rømer**) مواليد ١٦٤٤ وتوفي ١٧١٠ .

يتحرك بسرعة محدودة في الفضاء فاللحظة التي نشاهد فيها خسوف قمر المشتري غير اللحظة التي حدث فيها فعلا والفرق بينهما هو الزمن اللازم للضوء لكي يقطع المسافة بين المشتري إلي الأرض . ولما كانت هذه المسافة متغيرة بسبب حركة كل من الأرض والمشتري حول الشمس ، فمن ذلك ينشأ تفاوت في طول الفترة بين خسوفين متتالين .

وقد قام (رومر) فعلا بحساب سرعة الضوء من مشاهدته هذه الظاهرة فقدَّر لها أكثر بقليل من قيمتها الحقيقية وهي نحو ١٨٦ ألف ميل في الثانية وهو ما يعادل نحو ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية الواحدة([1]).

★ **مشاهدة برادلي للزيغ الفلكي :**

وفي عام ١٧٢٦ شاهد الفلكي الإنجليزي (برادلي)([2]) ظاهرة أخري مكنته من قياس سرعة الضوء في الفضاء ، فقد لاحظ أن مواقع النجوم التي تعرف بالثابتة تتغير تغيرا سنويا " انظر الفصل الثاني من ذيل هذا الكتاب " بحيث يرسم موقع كل نجم علي وجه العموم قطعا ناقصا صغيرا في السماء .

وقد علل برادلي هذه الظاهرة تعليلا صحيحا بأن قال إن الموقع الظاهري للنجم يتوقف علي سرعة الأرض في مدارها حول الشمس بمثل ما تتوقف علي سرعة القطار زاوية نزول المطر التي ترسمها قطراته علي زجاج قطار متحرك . فلو فرضنا أن المطر يهطل في اتجاه رأسي علي الأرض فإن آثار قطراته علي زجاج النافذة لا تكون خطوطا رأسية بل تكون خطوطا مائلة يزداد ميلها علي الاتجاه الرأسي بازدياد سرعة القطار ، وكذلك الأشعة الواصلة إلينا من النجم فإن ميلها يتوقف علي حركة الأرض .

وقد تمكن (برادلي) من قياس سرعة الضوء قياسا مبنيا علي مشاهدته الفلكية فوجد هذه السرعة مساوية للسرعة التي وجدها (رومر) قبله ، وتعرف ظاهرة برادلي هذه بظاهرة الزيغ الفلكي ، وسيأتي الكلام عنها فيما بعد .

([1]) طبقا لموسوعة الويكيبيديا فإن رومر استنتج سرعة الضوء بمقدار ٢٢٠ ألف كيلومتر في الثانية الواحدة .
([2]) الفلكي الانجليزي جيمس برادلي (James Bradley) توفي في الثالث عشر من يوليو عام ١٧٦٢ م .

ومن الطريف أن مشاهدات رومر هي التي نعتبرها الآن فاتحة عصر جديد في دراسة العلوم الطبيعية والفلكية ، أن هذه المشاهدات لم يؤبه لها في حينها بل ألقيت في زوايا النسيان حتى جاء برادلي فاستلفت نظر العلماء إليها .

* تجربة فيزو :

وفي عام ١٨٤٩ قام (فيزو) ([1]) لأول مرة بإجراء تجربة أرضية (أي غير فلكية) لقياس سرعة الضوء ، وقد استخدم لذلك جهازا يدل علي براعته وسعة حيلته ، ويتركب الجزء الرئيسي من الجهاز من عجلة مسننة تدور حول محورها ويمر الضوء في الفتحة الواقعة بين سنتين من أسنانها ثم ينعكس علي مرآة ترده إلي نفس النقطة التي بدأ منها ، وكانت العجلة في تجربة فيزو تحتوي علي ٧٢٠ سنا متساوية الأبعاد ، وكانت المسافة بين العجلة والمرآة العاكسة ٨,٦ من الكيلومترات ، فإذا دارت العجلة بحيث يكون الزمن الذي يقطع فيه الضوء هذه المسافة ذهابا وإيابا مساويا للزمن الذي يحل فيه سن من أسنان العجلة محل الفتحة الواقعة بين هذا السن والسن الذي قبله ، إذا تساوي هذان الزمنان فإن الضوء الذي مر من الفتحة ثم انعكس عن المرآة يجد عند عودته سنا يقف في سبيله ويحول دون رؤية العين له ، وبذلك تظهر المرآة مظلمة .

وقد استخدم كورنو([2]) عام ١٨٧٤ ، وكذلك ينج([3]) وفوربز([4]) عام ١٨٨١ ، وبيروتان([5]) عام ١٩٠٠ طريقة فيزو لقياس سرعة الضوء مع بعض التحسين في هذه الطريقة فوصلوا جميعا إلي تقدير سرعة الضوء بنحو ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية وكانت نتيجة بيروتان ٢٩٩,٨٦ ألف كيلومتر في الثانية .

([1]) الفيزياء الفرنسي أرمان هيبولي لويس فيزو (**Armand Hippolyte Louis Fizeau**) توفي عام ١٨٩٦ .
([2]) الفيزيائي الفرنسي ماري ألفريد كورنو (**Marie Alfred Cornu**) توفي في الثاني عشر من إبريل عام ١٩٠٢ .
([3]) الكيميائي الاسكتلندي جيمس ينج (**James Young**) ، ولد ١٣ يوليو ١٨١١ وتوفي في ١٣ مايو سنة ١٨٨٣ م .
([4]) المهندس العبقري والفلكي والمستكشف البروفيسور جورج فوربز (**George Forbes**) وفيات سنة ١٩٣٦ م .
([5]) الفلكي الفرنسي هنري جوزيف أنستاس بيروتان (**Joseph Perrotin**) توفي في ٢٤ فبراير سنة ١٩٠٤ م .

* تجربة فوكو :

وفي عام ١٩٦٣ استخدم فوكو([1]) جهازا مستحدثا لقياس سرعة الضوء بواسطة مرآة تدور حول محور ثابت وأحلّ هذه المرآة محل العجلة المسننة في طريقة فيزو وينشأ عن دوران هذه المرآة أن الضوء الذي ينعكس عنها وعن المرآة الثابتة لا يعود إلي نفس النقطة التي بدأ منها ، وبعبارة أخري تنتقل الصورة الضوئية مسافة يتوقف مقدارها علي سرعة دوران المرآة ، وميزة طريقة فوكو إمكان إجرائها في حيز صغير فالمسافة بين المرآتين في تجربة فوكو كانت عشرين مترا مقابل ٨،٦ كيلومتر في تجربة فيزو .

وقد أعاد نيكلسن (Nicholson) عام ١٨٨٢ تجربة فوكو مع بعض التحسينات في الطريقة فوصل إلي تقدير سرعة الضوء بمقدار ٢٩٩،٨٥ ألف كيلومتر في الثانية .

ويستطيع القارئ أن يرجع إلي كتب الطبيعة الابتدائية ليقف علي وصف الأجهزة التي استخدمها فيزو وفوكو لقياس سرعة الضوء فأمرها شائع معروف لتلاميذ المدارس الثانوية .

([1]) الفيزيائي الفرنسي جان برنار ليو فوكو (**Jean Bernard Léon Foucault**) وفيات فبراير سنة ١٨٦٨ م .

الباب الثالث

الحركة وسرعة الضوء

ذكرت أن برادلي عام ١٧٢٦ قد تمكن من قياس سرعة الضوء في الفضاء من مشاهدة التغير في مواقع النجوم الناشئ عن سرعة الأرض في حركتها حول الشمس ووعدتُ بأن أعود إلي هذه الظاهرة التي تعرف بظاهرة الزيغ الفلكي .

إن تفسير هذه الظاهرة مبني علي افتراض أن الضوء له سرعة في الفضاء وأن هذه السرعة حقيقة مطلقة يدركها أو يشاهدها من كان ثابتا في الفضاء . أما من كان متحركا فيه فإنه لا يشاهد هذه السرعة المطلقة أو الحقيقية وإنما يشاهد سرعة أخري نسبية تختلف عن هذه السرعة الحقيقية في الفضاء الثابت بقدر حركة المشاهد . والمثل الذي سقته والذي يضرب عادة لشرح هذه الظاهرة هو هطول المطر علي نافذة قطار متحرك . فالمطر له سرعة حقيقية يشاهدها من كان ثابتا في مكانه علي الأرض أما سرعته بالنسبة إلي القطار المتحرك فسرعة نسبية تتوقف علي سرعة القطار .

وكلنا يعلم أن أضواء النيرين والكواكب المتحيرة والنجوم الثابتة تذرع الفضاء ليل نهار . فهذه الأضواء هي بمثابة أمواج في بحر محيط تتحرك كل موجة منها في البحر بسرعة ١٨٦ ألف ميل في الثانية الواحدة . والأرض بمثابة مَرْكَبٍ تسير في هذا البحر ونحن نشاهد حركة الضوء من مركبنا فنجد له سرعة نسبية تختلف عن سرعته الحقيقية .

* القول بوجود الأثير :

هذا البحر الذي تحدث فيه أمواج الضوء إنما هو معني مجازي لجأ بعض العلماء في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر إلي تصوره لعجزهم عن تصور أمواج تحدث في لا شيء . فوجود التموج يقتضي وجود شيء متموِّج تقوم به الحركة .

هذا الشيء المتموج أو الوسط المهتز هو ما سمي (بالأثير) وقد عرفه بعضهم بأنه اسم الفاعل من الفعل تَمَوَّج . وتصوره العلماء في أول الأمر علي أنه جسم متناه في اللطف يملأ فضاء العالمين . وتصوروا النور علي أنه اهتزاز في هذا الأثير كما أنهم صوروا المادة كما لو كانت نقطا متكاثفة فيه .

* الأثير والزيغ الفلكي :

والتفسير البسيط لظاهرة برادلي هو أنه الأثير راكد لا يتأثر بسرعة الأرض . ولذلك فإن أمواجه وهي الضوء يتغير مظهرها كلما تغيرت حركة الأرض فيه . وللقارئ أن يسمي الأثير باسم آخر وهو الفضاء العاري عن المادة أو الفضاء المطلق ويكون التفسير البسيط لظاهرة الزيغ الفلكي أن هناك فضاءً مطلقا أو مكانا مطلقا تحدث فيه الظواهر الضوئية وتحل فيه المادة وأن حركة الأرض وسائر المواد في هذا الفضاء تتحرك لكن الفضاء ذاته ثابتا لا يتغير .

* تجربة إيري :

وقد أدرك (إيري)([1]) الفلكي الإنجليزي أنه إذا كانت حركة الأرض في الأثير تتركه راكدا فإن ظاهرة الزيغ الفلكي يجب أن تتوقف علي سرعة الضوء في الوسط الذي تحدث فيه هذه الظاهرة . ولامتحان ذلك أعاد مشاهدة برادلي بمنظار مملوء بالماء فلم يجد أي اختلاف في الزيغ الفلكي كنتيجة لذلك .

* تجربة أراجو :

وقد أجري أراجو([2]) تجربة لقياس أثر حركة الأرض في الفضاء في زاوية انحرف شعاع ضوئي بسبب انكساره في منشور زجاجي فلم يعثر علي نتيجة .

ومع أن هاتين التجربتين السلبيتين كان من شأنهما أن يزعزعا عقيدة العلماء في وجود الأثير إلا أنهم تمكنوا من تفسير هذا الأثر السلبي تفسيرا

([1]) الفلكي الانجليزي السير جورج بريديل إيري (**George Biddell Airy**) مواليد ١٨٠١ ومات في ٢ يناير ١٨٩٢ م .

([2]) العلامة الفرنسي ورئيس الوزراء الأسبق فرنسوا جان دومنيك أراجو (**François Jean Dominique Arago**) توفي في الثاني من أكتوبر سنة ١٨٥٣ م .

مقبولا وذلك بافتراض أن المادة إذا تحركت في الأثير فإنها لا تتركه راكدا تماما بل إنها تحركه معها حركة صغيرة كما يحرك القطار الهواء المحيط به أثناء حركته " انظر الفصل الثالث من الذيل "([1]) ومن نتائج هذا الافتراض أن سرعة الضوء في وسط متحرك تكون أكبر من سرعته إذا كان الوسط ثابتا طبقا لقانون يعرف بقانون (فرينل)([2]) .

★ تحقيق فيزو لقانون فرينل :

وفي سنة ١٨٥٩ أجري فيزو تجربة للتحقق من صحة هذه النتيجة فقاس سرعة الضوء في ماء متحرك وقارنها بسرعته في الماء الساكن وقد جاءت تجربة فيزو محققة لقانون فرينل ، وقد فُسر قانون فرينل تفسيرا بسيطا بأن المادة المتحركة تجر الأثير معها في حركتها .

وفي سنة ١٨٩٣ قام السير أوليفر لودج([3]) بإجراء تجربة للتحقق من صحة هذا الزعم فأدار عجلة ثقيلة حول محورها بسرعة كبيرة فإذا كانت العجلة تجر الأثير معها في حركتها فإن سرعة الضوء بالقرب من حافة العجلة يجب أن تختلف عنها في الفضاء الراكد ولكن تجربة لودج جاءت بنتيجة سلبية .

★ تجربة ميكلسن ومورلي :

وفي سنة ١٨٨٧ قام ميكلسن([4]) ومورلي([5]) بإجراء تجربة كان لها أثر بليغ في توجيه الفكر العلمي . إذا كان الضوء حادثا في الأثير الراكد أو في الفضاء المطلق العاري عن المادة . وكانت الأرض متحركة في هذا الفضاء فإنه يلزم أن تختلف سرعة الضوء بالنسبة إلينا باختلاف حركة الأرض في الفضاء ، وحركة الأرض حادثة في اتجاه معين وبقدر معين .

وإذن فإن سرعة الضوء لا يمكن أن تكون متساوية في جميع الاتجاهات ، فالقول بوجود أثير راكد تتحرك الأرض فيه معناه القول بوجود تيار من هذا الأثير يهب علي الأرض من ناحية معينة وبسرعة معينة . ويمكن تشبيه ذلك

([1]) سيتم رفع الملحقات تباعا بعد الانتهاء من الجزء النظري .
([2]) المهندس الفرنسي أوغسطين جان فرينيل (**Augustin-Jean Fresnel**) توفي في ١٤ يوليو عام ١٨٢٧ م .
([3]) الفيزيائي البريطاني أوليفر جوزيف لودج (**Sir Oliver Joseph Lodge**) توفي في ٢٢ أوغسطس عام ١٩٤٠ م .
([4]) الفيزيائي الأمريكي ألبرت إبراهام ميكلسون (**Albert Abraham Michelson**) توفي في ٩ مايو سنة ١٩٣١ م .
([5]) البروفيسور الأمريكي إدوارد وليام مورلي (**Edward Williams Morley**) توفي في ٢٤ فبراير سنة ١٩٢٣ م .

بتيار الماء في نهر كما يمكن تشبيه حركة الضوء في الأثير بحركة سباح في هذا الماء .

ولنفرض أن سباحا عبر نهرا من نقطة علي شاطئه إلي النقطة المقابلة لها علي الشاطئ الآخر ثم عاد إلي حيث ابتدأ . في هذه الحالة يكون السباح متحركا في اتجاه عمودي علي اتجاه التيار . ولنفرض أن السباح نفسه قطع نفس المسافة ذهابا وإيابا ولكن في اتجاه التيار ذاته . ولنفرض أيضا أن سرعة السباح بالنسبة إلي الماء ثابتة في الحالتين . هل الزمن الذي يستغرقه السباح في الحالة الأولي أكبر أو أصغر من الزمن اللازم له في الحالة الثانية ؟

هذا سؤال جوابه وإن لم يكن بديهيا إلا أنه غير مستعصي " وفي الفصل الرابع من الذيل " يجد القارئ الحل الرياضي لهذه المسألة ويجد البرهان علي أن الزمن في الحركة الأولي – العمودية علي التيار – أصغر منه في الثانية وهي حالة الحركة الموازية للتيار .

وقد أجري ميكلسن ومورلي تجربتهما بغاية الدقة والإحكام . فسرعة الأرض في حركتها حول الشمس تعادل نحو ٣٠ كيلومترا في الثانية . وقد كانت تجربة ميكلسن ومورلي تسمح بقياس سرعة تعادل نحو عشر هذا المقدار أي ٣ كيلومترات في الثانية . ومع ذلك فقد أتت هذه التجربة بنتيجة سلبية تماما .

وقد أعيدت تجربة ميكلسن ومورلي مرارا في أوقات مختلفة من السنة وبعناية فائقة إلا أن كل الجهود التي بذلت للحصول علي نتيجة إيجابية قد أخفقت تماما .

ومعني تجربة ميكلسن ومورلي أنه إذا كان هناك أثير راكد حامل للضوء تتحرك الأرض فيه فإن سرعة الأرض في هذا الأثير ليست كمية يمكن قياسها ومعرفة مقدارها واتجاهها . وقد وضعت هذه التجربة الفرض الأثيري في موضع يكاد يكون مستحيلا فمن ناحية لا يمكن التسليم بأن الأرض ساكنة في الأثير لا تتحرك فيه صيفا ولا شتاءا . ومن ناحية أخري فقد التجارب عن قياس سرعة الأرض في الأثير .

* **انكماش فيتزجرالد :**

وقد حاول فيتزجرالد([1]) أن يفسر النتيجة السلبية لتجربة ميكلسن ومورلي بأن افترض أن إذا تحرك جسم في الأثير فإنه ينكمش في اتجاه حركته بنسبة تزداد بازدياد سرعته . وعلي ذلك فإن الجهاز الذي استخدمه فيتزجرالد قد انكمش في الاتجاه الموازي لحركة تيار الأثير وبذلك ينقص الزمن اللازم لحركة الضوء في هذا الاتجاه ويصير مساويا لزمن الحركة العمودية علي اتجاه التيار ويظهر هذا الفرض لأول وهلة مصطنعا مطبوعا بطابع التلفيق فنحن نعلم أن الزمن اللازم لقطع مسافة معينة ذهابا وإيابا في الاتجاه العمودي علي تيار الأثير أصغر من الزمن اللازم لقطع نفس المسافة في الاتجاه الموازي للتيار . ثم إذا أجرينا التجربة وجدنا أن الزمنين هما في الواقع ونفس الأمر متساويين . قلنا إن ذلك راجع إلي انكماش الأبعاد في الاتجاه الموازي للتيار . وقلنا إن هذا الانكماش حادث بنفس النسبة اللازمة لجعل الزمنين متساويين .

علي أن انكماش فيتز جرالد له مايؤيده من الناحية النظرية فمن الممكن البرهنة علي أن الإليكترون أو غيره من الجسيمات الكهربائية إذا تحرك فإنه ينكمش في اتجاه حركته بفعل القوي الكهربائية المؤثرة فيه . ومن الغريب أن نسبة الانكماش هي نفس النسبة التي يتطلبها فيتزجرالد . ولما كانت المادة مؤلفة من جسيمات كهربائية فليس بعجيب أن ينكمش اللوح الحجري الذي استخدمه فيتزجرالد في تجربته بنفس النسبة .

* **محاولة قياس الانكماش :**

وفي عام ١٩٠٨ قام تراوتن([2]) . ورانكن([3]) بإجراء تجربة للعثور علي انكماش فيتزجرالد وأساس هذه التجربة أن المقاومة الكهربائية لسلك فلزي تتوقف علي طوله فإذا تغير الطول تغيرت المقاومة . وقد قام تراوتن ورانكن بقياس المقاومة الكهربائية لشريط فلزي في اتجاهين متعامدين أحدهما مواز والأخر عمودي علي حركة الأرض فكانت النتيجة سلبية .

([1]) البروفيسور جورج فرانسيس فيتزجرالد (**George Francis FitzGerald**) توفي في ٢٢ فبراير سنة ١٩٠١ م .
([2]) الفيزيائي فريدريك تراوتن (**Frederick Thomas Trouton**) توفي في ٢١ سبتمبر سنة ١٩٢٢ م .
([3]) البروفيسور أليكساندر أوليفر رانكن (**Alexander Oliver Rankine**) توفي في ٢٠ يناير سنة ١٩٥٦ م .

إلا أن بعض العلماء فسر هذه النتيجة السلبية بأنه وإن كان الانكماش واقعا فعلا إلا أن الاليكترونات الحاملة للتيار تتباعد المسافات بينها فيمحوا ذلك أثر الانكماش وتبقي النتيجة الإجمالية سلبية .

⭑ ظاهرة دوبلر([1]) :

ولنترك هذه النتائج السلبية ونعود بالقارئ إلي ظاهرة إيجابية كشف عنها عام ١٨٤٢ تقترن باسمي دوبلر و فيزو . ولكي نفهم هذه الظاهرة الضوئية سنبحث عن ظاهرة صوتية شبيهة بها تقترن باسم دوبلر أيضا . ولنفرض أن قطارا متحركا متجها في حركته نحونا قد أطلق صفارته . فمن المشاهد أن حركة القطار نحونا ترفع من حدة الصفير أي عدد الذبذبات الهوائية التي تصل إلينا في الثانية الواحدة .

فإذا كان القطار مبتعدا عنا انخفضت حدة الصفير وصارت طبقة الصوت أوطأ مما هي . هذا التغير الظاهري في حدة الصوت الناشئ عن حركة اقتراب أو ابتعاد منبعه هو ما يسمي بظاهرة دوبلر الصوتية . وإذا كان منبع الصوت ثابتا وكان المستمع هو المتحرك فإن حدة الصوت تزداد إذا كان المستمع مقتربا من المنبع الصوتي وتنقص إذا كان مبتعدا عنه .

هذا في الصوت . وتحدث نفس الظاهرة في الضوء . فالنجوم التي تقترب منا يزداد عدد الأمواج التي يصلنا منها في الثانية الواحدة ويقصر طول الموجة تبعا لذلك فيضرب لونها إلي الزرقة علي عكس النجوم التي تبتعد عنا فإن أطوال أضوائها تطول ويضرب لونها إلي الحمرة . وفي الفصل الخامس من هذا الكتاب يجد القارئ الشرح الكمي المضبوط لهذه الظاهرة .

([1]) كريستيان أندرياس دوبلر (**Christian Andreas Doppler**) توفي في ١٧ مارس سنة ١٨٥٣ م .

* **النتائج السلبية والنتائج الإيجابية :**

وإذا نظرنا إلي التجارب والمشاهدات التي ذكرناها في هذا الباب فإننا نجدها تنقسم قسمين إيجابي وسلبي طبقا لما هو مفصل في القائمة التالية :

المشاهدات والتجارب الإيجابية	التجارب السلبية
الزيغ الفلكي (برادلي)	تجربة (إيري) المنظار المملوء ماء
سرعة الضوء في ماء متحرك (فيزو)	تجربة (أراجو) المنشور الزجاجي
ظاهرة (دوبلر)	تجربة (لودج) القرص الدائر
	تجربة (ميكلسن ومورلي) سرعة الأثير
	تجربة (تراوتن ورانكن) المقاومة الكهربائية

ويلاحظ أن كل نتيجة من النتائج الإيجابية تقترن بحركة نسبية بين جسمين ماديين . فالزيغ الفلكي يقترن بحركة الأرض بالنسبة للشمس ، وجهاز فيزو يحتوي علي ماء متحرك بالنسبة إلي الأرض ، وظاهرة دوبلر أساسها الحركة النسبية بين الرائي ومنبع الضوء . أما النتائج السلبية فكلها ترمي إلي قياس حركة الأرض بالنسبة إلي الأثير المزعوم . ولو أن واحدة من هذه التجارب أتت بنتيجة إيجابية لعرفنا من هذه النتيجة مقدار سرعة الأرض في الأثير الراكد .

الباب الرابع

ثبوت سرعة الضوء ومبدأ النسبية

*** إنكار وجود الأثير – نسبية الزمان والمكان :**

بينا في الباب الثالث كيف أن كل محاولة لقياس سرعة الأرض في الأثير الراكد قد أخفقت . فالقائمة الواردة في آخر الباب تبين بوضوح أن السرعة النسبية بين جسمين ماديين قد يكون لها أثر محسوس في الظواهر المشاهدة . أما السرعة المطلقة لجسم في الأثير الراكد فلا أثر لها في المشاهدات ولا وسيلة لقياسها .

وهنا نتساءل : أيجوز لنا أن نفترض وجود مكان مطلق إذا كانت كل الوسائل التي نملكها عاجزة عن قياس سرعتنا في هذا المكان ؟

وما معني القول بوجود أثير راكد إذا كنا لا نستطيع تحديد مقدار حركتنا في الأثير ولا اتجاهها ؟

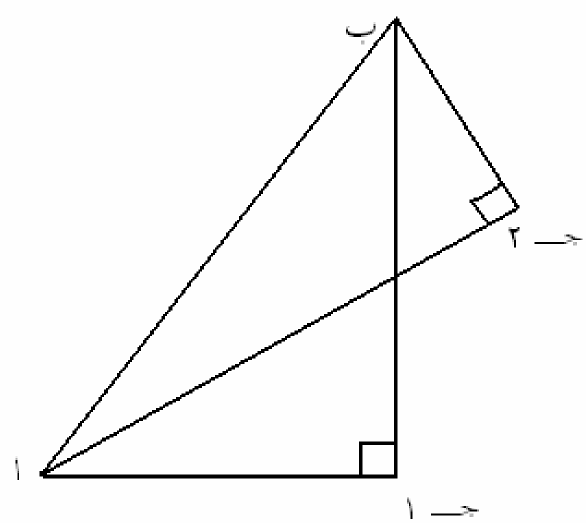
أليس الأولي بنا أن نعدل عن فرض وجود هذا الأثير المكاني وأن نقول بنسبية المكان ؟

وإذا كان المكان نسبيا غير مطلق وكانت الحركة نسبية أيضا فما معني التمسك بإطلاقية الزمن ؟

هذه هي الأسئلة التي أثارها أينشتين عام ١٩٠٥ والتي أجاب عنها إجابة واضحة صريحة . وقد أنكر أينشتين وجود أثير راكد كما أنكر وجود زمان مطلق ، ولما كانت تجربة " ميكلسن ومورلي " قد أثبتت بجلاء أن سرعة الضوء ثابتة لا تتغير ، فقد اعتبر أينشتين هذا الثبوت مبدأ أساسيا في نظريته الخاصة ، فثبوت سرعة الضوء في نظره قانون أساسي من قوانين الطبيعة . ولما كانت القوانين الطبيعية طبقا لمبدأ النسبية مستقلة عن الزمان وعن المكان وعن الحركة فإن سرعة الضوء يجب أن تكون كذلك مستقلة عنها جميعا .

٭ **نظرية فيثاغورس :**

وثبوت سرعة الضوء في النسبية الخاصة هو الذي يخلق من الزمان والمكان حقيقة ثابتة ذات أربعة أبعاد . وأنا أعلم أن هذه الجملة ليس من السهل إدراك معناها ومع ذلك فإن هذا المعني أساسي في النسبية ، ولذلك فسأحاول تقريبه إلي ذهن القارئ ما استطعت إلي ذلك سبيلا . وسأفترض أن القارئ ملم بتلك النظرية الرئيسية في علم الهندسة التي تعرف بنظرية فيثاغورس . فهذه النظرية حقيقة رئيسية في علم هندسة إقليدس ترتبط ارتباطا متينا بتصورنا للمكان . وخلاصة النظرية أنه إذا وجدت نقطتان أ ، ب ونقطة ثالثة جـ بحيث كانت الزاوية (أجـ ب) قائمة . فإن مربع البعد بين أ ، ب يساوي مجموع مربعي المستقيمين أ جـ و جـ ب ، ومهما كان موضع النقطة جـ فإن هذه الحقيقة تبقي ثابتة ما دامت (أ جـ ب) قائمة .



(شكل ١)

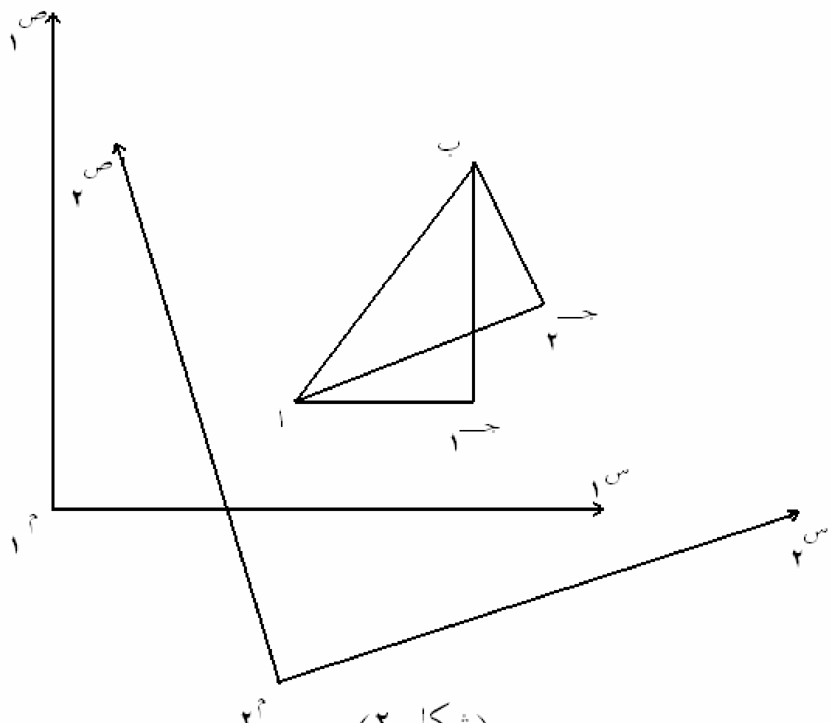
فإذا انطبقت جـ علي جـ١ كان مربع أب مساويا مربع أجـ١ زائد مربع جـ١ب .

وإذا انبطقت جـ علي جـ٢ كان مربع أب مساويا مربع أجـ٢ زائد مربع جـ٢ب .

وهكذا (انظر الشكل ١) فمربع البعد بين النقطتين أ ، ب إذن حقيقة ثابتة لا تتوقف علي موضع النقطة جـ (بشرط أن تكون الزاوية أجـ ب قائمة) .

* **استخدام الإحداثيات :**

ولنفرض أن راصدين أحدهما في نقطة م١ والآخر في نقطة م٢ رصد كل منهما المستقيم أب .



(شكل ٢)

ولنفرض أن الراصد الأول كان ينسب مواقع النقط الهندسية في الفضاء إلي اتجاهين ثابتين متعامدين م١س١ و م١ص١ ، وأن الراصد الثاني ينسبها إلي اتجاهين (أو محورين) آخرين متعامدين م٢س٢ و م٢ص٢ (انظر شكل ٢) . فبعد النقطة أ عن الراصد م١ في الاتجاه م١س١ ليس علي وجه العموم مساويا لبعد نفس النقطة أ عن الراصد م٢ في الاتجاه م٢س٢ وكذلك الحال بالنسبة إلي الاتجاهين الآخرين م١ص١ و م٢ص٢ فإن بعدي نقطة أ عن الراصدين في هذين الاتجاهين ليسا بالضرورة متساويان . وإذن فالراصد م١ سيحدد موضع النقطة أ بالنسبة إلي محوريه م١س١ و م١ص١ بعددين يختلفان عن العددين اللذين يستخدمهما الراصد م٢ لتحديد موضع نفس النقطة أ بالنسبة للمحورين م٢س٢ و م٢ص٢ .

ويسمي العددان اللذان يستخدمهما الراصد م١ لتحديد نقطة أ بالنسبة إلي المحورين م١س١ و م١ص١ يسمي هذان العددان إحداثي النقطة أ بالنسبة للمجموعة م١س١ص١ .

وكذلك يسمي العددان اللذان يستخدمهما الراصد م٢ لتحديد موضوع نفس النقطة أ إحداثي النقطة أ بالنسبة إلي المجموعة م٢س٢ص٢ . ويكون المعني أن إحداثي نقطة أ في المجموعة الأولي يختلفان عنهما في المجموعة الثانية . وما قيل عن نقطة أ يقال عن نقطة ب فإن إحداثييها سيختلفان في المجموعتين . وسنسمي إحداثي نقطة أ في الاتجاه م١س١ الإحداثي السيني لهذه النقطة في المجموعة الأولي . وإحداثيها في الاتجاه م١ص١ الإحداثي الصادي في المجموعة الأولي . وكذلك سنسمي إحداثي نقطة أ في الاتجاه م٢س٢ الإحداثي السيني لنقطة أ في المجموعة الثانية . وإحداثيها في الاتجاه م٢ص٢ الإحداثي الصادي لها في المجموعة الثانية . فنقطة أ سيكون لها إحداثيان أحدهما سيني والآخر صادي في المجموعة الأولي . وسيكون لها إحدثيان آخران سيني والآخر صادي في المجموعة الثانية . فالإحداثيان الأولان كما تقدم ليسا بالضرورة مساويين للإحداثيين الثانيين . وما قيل عن نقطة أ يقال عن نقطة ب . فنقطة ب سيكون لها إحداثيان في المجموعة الأولي أحدهما سيني والآخر صادي وإحداثيان آخران أحدهما سيني والآخر صادي في المجموعة الثانية .

*** تطبيق نظرية فيثاغورس علي الإحداثيات المتعامدة :**

وقليل من التأمل يدلنا علي أن الفرق بين الإحداثيين السينيين للنقطتين أ و ب في المجموعة الأولي هو المستقيم أجـ١ . كما أن الفرق بين الإحداثيين الصاديين للنقطتين أ و ب في نفس المجموعة هو المستقيم جـ١ب . ونظرية فيثاغورس في المجموعة الأولي يكون معناها يكون معناها أن مجموع مربعي هذين الفرقين مساويا لمربع طول أب . وكذلك في المجموعة الثانية ، فإن مجموع مربعي فإن مجموع مربعي هذين الفرقين فيها يكون مساويا أيضا لمربع الطول أب . فالراصدان م١، م٢ سيختلفان علي كل عدد من الأعداد (أو الإحدثيات) الأربعة اللازمة لتحديد موضعي النقطتين أ ، ب . ومع ذلك فإنهما سيتفقان حتما علي طول أب ذاته .

والفرق بينهما أن أحدهما يعتبر مربع طول أب مجموعا لمربعي أجـ١ ، جـ١ب . أما الآخر فإنه يعتبر مربع طول أب مجموعا لشيئين آخرين هما مربعا أجـ٢ ، جـ٢ب .

فمربع طول أب حقيقة ثابتة لا تتوقف علي الراصد ولا علي إحداثياته ومحاوره التي يستخدمها في رصده وقياسه . أما المحاور ذاتها والأرصاد التي يستخدمها فهي مسائل خلافية تتوقف علي مكانه الهندسي وعلي علاقته الهندسية بالحقيقة الخارجية . والبعد أب إذن شيء مجرد أو مطلق لا يختلف فيه اثنان . أما المحاور والإحداثيات فظلال زائلة . ولكي أقرب هذا المعني إلي القارئ أذكره بالخرائط التي رسمها في المدارس الابتدائية والثانوية ، فإنه لكي يرسم هذه الخرائط يستعين عادة بخطوط تساعده علي رسمها وهذه الخطوط يرسمها التلاميذ بالقلم الرصاص ليستعينوا بها علي رسم الخرائط ، ثم هم بعد ذلك يزيلون آثارها ويستبقون الحقيقة وحدها مجردة عن تلك الخطوط . هذه الخطوط التي يستعان بها في رسم الخرائط قد تكون خطوط الطول وخطوط العرض ، وهي مفيدة كل الفائدة في تعيين مواضع البلدان بل هي مما لا يستغني عنه في علم الجغرافيا ومع ذلك فكلنا يعلم أن مدار السرطان ومدار الجدي وخط الاستواء وكذلك خط الزوال المار بجرينتش كل هذه إن هي إلا خطوط وهمية لا حقيقة لها في الواقع ونفس الأمر علي سطح الكرة الأرضية .

⋆ **الإحداثيات علي سطح الكرة – خطوط الطول وخطوط العرض:**

فالإحداثيات السينية والصادية التي أتعبت القارئ بوصفها وشرحها هي خطوط وهمية في هندسة العالم كما أن خطوط الطول وخطوط العرض خطوط وهمية في هندسة الكرة . ومع ذلك فكلاهما لازم لهندسته بل إنه لا يكاد يمكن تصور الهندسة بدونه .

والزمان والمكان في نظر أينشتين ومينكوفسكي بمثابة الطول والعرض علي سطح الكرة ، فهما وسيلتان يستعان بهما علي وصف هندسة الكون كما يستعان بالطول والعرض علي وصف هندسة الكرة ، وارتباطهما بالحقيقة الكونية كارتباط الطول والعرض بالحقيقة الجغرافية .

إذا قلنا إن خط طول مدينة القاهرة هو ٣٠ ° شرقا ، فهل نحن نعبر عن حقيقة لا يجوز أن يختلف فيها اثنان ؟ وبعبارة أخري هل هذه الحقيقة مطلقة مجردة عن كل اعتبار آخر ؟ إننا نعلم أنه لكي نحدد زاوية طول مكان ما علي سطح الكرة ، وجب علينا أولا أن نختار قطرا في الكرة نعتبر طرفيه قطبين ،

ثم علينا بعد ذلك أن نختار مستويا مارا بهذا القطر نجعله مبدأ لقياس زوايا الطول . فالكرة يمكن أن يرسم علي سطحها دوائر طول ودوائر عرض بعدد لا نهاية له من الطرق المختلفة . وفي حال الكرة الأرضية نعتبر محور الدوران حول نفسها قطرا يحدد القطبين ثم نصطلح علي اتخاذ خط الطول المار ببلدة جرينتش أصلا لقياس زوايا الطول . فالمسألة كما يتضح للقارئ إذن مسألة تواضع واصطلاح . فمن اصطلح معنا علي محور دوران الأرض وعلي بلدة جرينتش كأساسين للقياس اتفق معنا علي خط طول مدينة القاهرة ، وعلي غيره من خطوط الطول وخطوط العرض . أما من خالفنا في اختيار المحور المحدد للقطبين أو في أساسية خط طول مدينة جرينتش ، أو في كلا الأمرين معا ؛ فإنه لن يتفق معنا علي أن خط طول مدينة القاهرة هو ٣٠ درجة تقريبا ، وعلي غيره من خطوط الطول وخطوط العرض . ويحس بالقارئ أن يميز بين الاصطلاح علي جرينتش والاتفاق علي القطبين . فالاصطلاح علي جرينتش وإن نشأ عنه خلاف إلا أن هذا الخلاف طفيف ، فهو لا يؤثر في خطوط العرض أبدا ، كما أن تأثيره في قياس الطول محصور في إضافة أو طرح كمية ثابتة . فالذين اتخذوا باريس أصلا لقياس خطوط الطول ، إنما اختلفوا عن الذين اتخذوا جرينتش بقدر ما بين البلدين من فرق في خط الطول . أما الخلاف علي المحور المحدد للقطبين فخلاف من نوع آخر ، إذ هو خلاف علي طريقة تقسيم السطح الكروي ، وهو خلاف علي معني الطول ومعني العرض لا تمكن إزالته بمجرد إضافة أو طرح كمية ثابتة ، بل لا بد من مزج الطول بالعرض لكي تُمْكِنَ المقارنة .

والذي يطلبه منا أينشتين هو هذا المزج بين الزمان والمكان لكي تتيسر المقارنة بين النتائج التي يصل إليها راصدان مختلفان يرصدان الكون ، ويدونان أزمنة الحوادث وأمكنتها .

* **استقلال المسافة بين مكانين عن الإحداثيات .**

علي أننا مهما نختلف علي المحور المحدد للقطبين ، أو علي مبدأ قياس الطول علي سطح الكرة ، فإننا لن نختلف علي البعد بين مكانين معلومين علي هذا السطح . فخط طول وخط عرض القاهرة قد يكونان أمرين اصطلاحيين ، وكذلك خط طول وخط عرض مدينة الإسكندرية . أما البعد بين القاهرة والإسكندرية ، فلا يتوقف علي موضع القطبين ولا علي المحور المحدد لهما ، ولا علي خط الزوال المار ببلدة جرينتش ولا علي أي اعتبار أو اصطلاح هندسي آخر . بل إن هذا البعد بين القاهرة والإسكندرية حقيقة واقعة خارجة عن نطاق الإحداثيات الهندسية وفلسفتها . وثبوت البعد بين نقطتين علي سطح الكرة هو أساس كل هندسة بسيطة يمكن أن نتصورها للكرة .

* **ثبوت " الفترة " بين حادثين :**

وقد جعل أينشتين ثبوت سرعة الضوء أساسا لثبوت ما سمي " الفترة " بين حادثين كما جعل ثبوت " الفترة " بين حادثين أساسا لهندسة الكون بمثل ما يكون ثبوت المسافة بين مكانين أساسا لهندسة المكان .

" وفي الفصل السادس من ذيل هذا الكتاب " يجد القارئ برهانا رياضيا علي أن ثبوت سرعة الضوء يؤدي إلي ثبوت يؤدي إلي ثبوت " الفترة " بين حادثين . " والفترة " بين حادثين حقيقة يمتزج فيها الزمان بالمكان ، كما يمتزج الإحداثي السيني وبالإحداثي الصادي في قياس البعد أب في (شكل ٢) ، وكما يمتزج الطول بالعرض (بطريقة أعم وأقرب إلي النظرية النسبية العامة) في البعد بين مكانين علي سطح الكرة .

* **الكون المؤلف من الحوادث :**

والكون الذي يتصوره أينشتين ليس كوناً مكانياً بل هو كونٌ مؤلفٌ من حوادث كل نقطة فيه حادث من الحوادث لها مكان وزمان يحدد موضعها . هذا الكون الحوادثي هو ما سماه مينكوفسكي " المتصل(1) المكاني الزماني " وما أسميه " الكون المكاني الزماني " .

وهذا الكون ليس فضاء ذا ثلاثة أبعاد بل هو أكثر من ذلك . فالفضاء ذو الأبعاد الثلاثة شيء نتصور وجوده في لحظة معينة فهو لا يشمل معني الزمان ، ثم إذا توالت اللحظات كان لكل لحظة فضاء ذو ثلاثة أبعاد خاص بها . فإذا تصورنا هذه الفضاءات مرتبة الواحد منها تلو الآخر في ترتيب زمني متصل وصلنا إلي معني "الكون المكاني الزماني" . ويمكن وصف "الكون المكاني الزماني" علي أنه مجموع ما كان وما هو كائن وما سيكون . وهو أشبه شيء بكتاب أو لوح دُونت فيه الحوادث ما مضي منها وما هو آت .

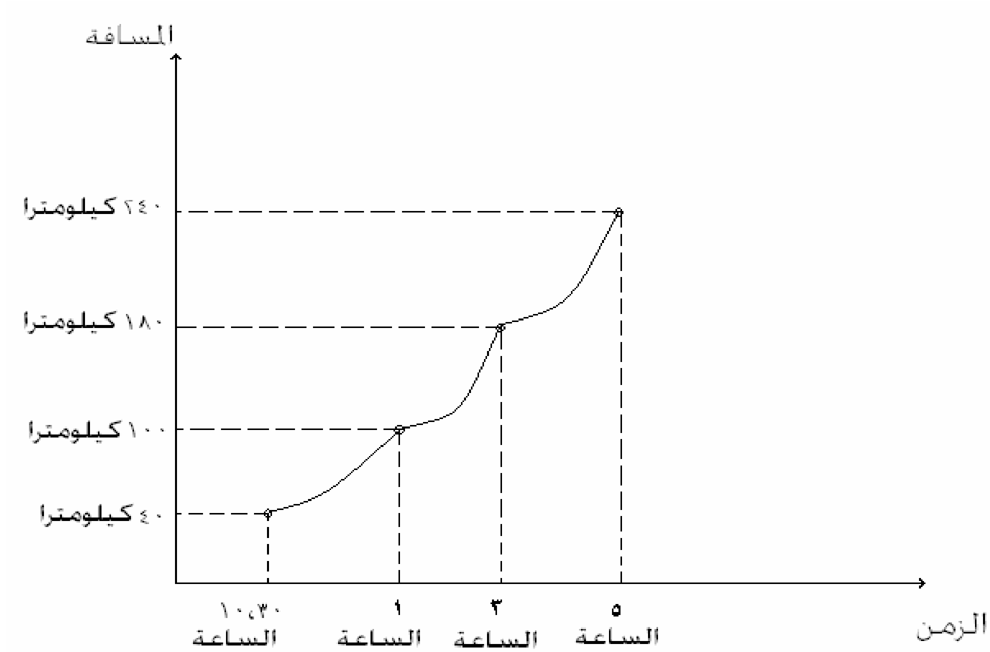
* **الكون المكاني الزماني كتعميم لفكرة الرسم البياني :**

وليست فكرة إبراز الماضي والمستقبل معا بطريقة هندسية ، ليست هذه الفكرة غريبة تماما علي طلبة مدارسنا ، بل إنها تدرس لهم تحت اسم الرسم البياني .

فإذا فرضنا أن قطارا تحرك في خط مستقيم ، فقام من بلد معين عند لحظة معينة ، ثم وصل إلي بلد آخر وانتقل من هذا البلد الأخير إلي بلد ثالث فوصله في وقت معين وهكذا ، وكانت المسافات بين البلدان المختلفة معلومة ، فإن من الممكن رسم خط يمثل حركة هذا القطار باستخدام التمثيل البياني كما في (شكل ٣) .

---

(1) (Continuum)



(شكل ٣)

ففي هذا الشكل قد بُين مكان القطار عند كل لحظة من لحظات الزمن . فنشأ عن ذلك خط يمثل تاريخ حركة القطار . هذا الخط مؤلف من مجموعة من النقط كل نقطة فيه تنبئنا بأن القطار كان في موضع معين (علي بعد كذا من الكيلومترات من نقطة معينة) عند زمن معين . والخط الذي يمثل حركة القطار في (شكل ٣) . هو ما يسميه مينكوفسكي الخط الكوني للقطار . وعلي ذلك فإن الخط الكوني إن إلا خط بياني .

⋆ الكون ذو الأبعاد الأربعة :

والخط الكوني في (شكل ٣) مرسوم علي صفحة الورقة التي هي فضاء ذو بعدين اتخذنا أحدهما لقياس المكان والآخر لقياس الزمان . ولما كان المكان مؤلفا من ثلاثة أبعاد فإن رسم الخطوط البيانية أو الخطوط الكونية للكائنات لا يكفي فيه سطح ورقة . بل ولا يكفي حجم ذو ثلاثة أبعاد . بل لابد من أربعة أبعاد متعامدة ثلاثة منها للمكان وواحد للزمان .

وهنا تنشأ صعوبة تظهر لأول وهلة علي شكل استحالة فيقال إن العقل البشري يستطيع أن يتصور فضاء ذا ثلاثة أبعاد . ولكنه يعجز عن تصور فضاء ذي أربعة أبعاد .

والرد علي هذا أن (شكل ٣) وهو كون مؤلف من بعدين ليس فضاءً هندسيا البتة فأحد أبعاده كما هو مبين بُعْدٌ هندسي يدل علي المسافة بين بلدين ، أما البعد الآخر فليس بعدا هندسيا بالمرة بل هو زمان . ووضع الزمان إلي جانب المكان في (شكل٣) إنما هو وسيلة يقصد من ورائها تمثيل حركة القطار بطريقة بيانية . ودراسة هذه الحركة دراسة رياضية تظهر فيها العلاقات المختلفة بين عنصريها الرئيسيين وهما الزمان والمكان . والعلوم الرياضية في دراستها لهذه العلاقات لا تميز بين العدد ٣ والعدد ٤ في بناء الأعداد المختلفة للحقيقة الرياضية . بل إن معادلات الحركة لما يسهل تعميمه بحيث يشمل أي عدد من الأبعاد .

فالمسألة ليست هي تصور أبعاد أربعة بل هي استخدام بعدٍ واحد للدلالة علي الزمان ، أما تركيب هذا البعد مع الأبعاد المكانية فمسألة رياضية بحتة تصدق علي البعدين كما تصدق علي عدة أبعاد .

ومن طريف ما يحكي عن أينشتين أن سيدة سألته كيف يمكن تصور أربعة أبعاد ؟

فسألها بدوره كم بعداً تستطيعين أن تتصوريه يا سيدتي ؟

فأجابت ثلاثة أبعاد طبعا .

فقال لها إن أقدر مني علي التصور ، فإنني لا أستطيع أن أتصور إلا بعدا واحداً .

والمغزى الذي تنطوي عليه هذه الحكاية أن تصور الأبعاد الهندسية كتصور العدد : أساسه تصور الواحد . فمن تصور الواحد وتصور الكثرة ينشأ معني العدد ولا فرق بعد هذا بين عدد وآخر . ولم ينكر أحد أن المكان الذي نعيش فيه مكان ذو ثلاثة أبعاد كما أن تركيب أجسامنا وطبيعة وظائف أعضائنا وعلي وجه الخصوص طريقة رؤيتنا للأجسام بالجمع بين صورتين تراهما عينان ، كل هذه الأمور من شأنها أن تجعل الفضاء ذا الثلاثة أبعاد يظهر لنا بمظهر مجسم ذي صبغة حقيقية . ولا أريد أن أخوض هنا في فلسفة الإدراك الحسي وأثره في التصور العقلي ، بل أكتفي بأن أؤكد للقارئ أن نظرية " النسبية " لا تتطلب منه إنكار المحسوسات الهندسية التي تظهر بديهية في خبرته الشخصية وإنما هي تنظم العلاقات بين هذه المحسوسات وتجعل منها وحدة فكرية متناسقة .

والبعد الزماني في الكون يختلف عن الأبعاد الثلاثة المكانية ، والمظهر الرياضي لهذا الاختلاف هو أن مربع "الفترة" لا يساوي مجموع مربعات الأبعاد الأربعة ، بل يساوي مجموع مربعات الأبعاد الثلاثة المكانية مطروحا منه مربع البعد الزماني([1]) .

فهذا الطرح بدلا من الجمع هو الذي يميز الإحداثي الزماني عن الإحداثيات المكانية ، وقد نشأ عن ذلك استخدام "زمن تخيلي" يساوي الزمن الحقيقي مضروبا في الجذر التربيعي للواحد السالب (أي الواحد المسبوق بعلامة ناقص) . ويجد القارئ في الذيل التاسع من هذا الكتاب تفصيلا لهذا البحث الرياضي .

([1]) هذا التعريف لمربع "الفترة" يختلف في إشارته عن الاصطلاح العادي . إلا أن هذا الاختلاف تواضعي وليس بجوهري .

الباب الخامس

بعض النتائج الطبيعية للنظرية النسبية الخاصة

ذكرت في الباب الأول أن النظرية النسبية تضحي بأشياء تظهر لأول وهلة كما لو كانت بديهية . وسأذكر في هذا الباب بعض النتائج الطبيعية التي جاءت بها النظرية النسبية مخالفة لما كان شائعا ومسلما به قبلها .

★ انكماش الأطوال :

جاءت النظرية النسبية الخاصة معززة لرأي "فيتزجرالد" بأن الأجسام المتحركة تنكمش في اتجاه حركتها بنسبة تتوقف علي مقدار الحركة . ويجد القارئ مقدار هذا الانكماش الظاهري مفصلا في الفصل السابع من ذيل هذا الكتاب .

والفرق بين فيتزجرالد و أينشتين في أمر هذا الانكماش فرق شكلي بحت ، فإن فيتزجرالد قد قال بهذا الانكماش ليفسر النتيجة السلبية لتجربة "ميكلسن ومورلي" ، أما أينشتين فإنه يجعل هذا الانكماش نتيجة لمبدأ عام يتخذه أساسا لنظريته ألا وهو مبدأ ثبوت سرعة الضوء ، وعلي الحالين فإن الانكماش حادث . ومعني ذلك أنه إذا تحركت عصا طولها متر مثلا في اتجاه طولها ، فإن العصا تنكمش ظاهريا فيصير طولها أقل من متر . ويجب أن نلاحظ أن السرعات اللازمة لإحداث انكماش محسوس في طول العصا يجب أن تكون سرعات محسوسة إذا قيست بسرعة الضوء ، ولما كانت سرعة الضوء كما قدمنا تساوي ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية الواحدة ، فإن سرعاتنا الأرضية بل والسرعات الفلكية في المجموعة الشمسية تتضاءل إلي جانب هذه السرعة الهائلة ؛ فأكبر سرعة لجسم أرضي متحرك لا تصل إلي ألف كيلومتر في الساعة ، وهذا أقل من ثلث كيلومتر في الثانية .

وسـرعة الأرض في حركتـها حـول الشـمس هـو نـحو ٣٠ كيلـومتراً في الثانية أي جزء من عشرة آلاف جـزء مـن سـرعة الضـوء . وإذا طبقنـا قـانون الانكماش الوارد في الذيل السابع من هـذا الكتـاب علـي هـذه السـرعة فـإن الانكماش في قطر الأرض الناشئ عن حركتها حـول الشـمس لا يصـل إلي ٧ سنتيمترات . ومع أن هذا الانكماش ضئيل في الأحوال العادية الـتي نعرفهـا إلا أن القول بحدوث الانكماش قـول يسـترعي النظـر . إذا أن معنـاه أن أطـوال الأجسام تختلف مقاديرها باختلاف السرعة النسبية بينـها وبـين مـن ينظـر إليها .

وبعبارة أخري فإن طول العصا لـيس حقيقـة مجـردة بـل هـي مسـألة نسبية . فطول العصا في نظري وطول نفس العصا في نظر راءٍ غيري كميتان مختلفتان يتوقف الفرق بينهما علـي السـرعة النسـبية بـيني وبـين الرائـي الآخر . فإذا تصورنا جدلا شخصا متحركا بالنسبة إلينـا (ولـيكن شخصـا علي كوكب في مجموعة شمسية أخري) بسرعة تساوي ٢٦٠ ألف كيلومتر في الثانيـة . فـإن هـذا الشـخص سـيختلف معنـا علـي أطـوال أجسـامنا الأرضية . فينسب إليها أطوالا تساوي نصف الأطوال التي ننسـبها إليهـا . فكل متر في نظرنا يعادل نصف متر في نظره هو . وسيقول هذا المشاهد أننا انكمشنا في اتجاه حركتنا .

والسؤال الذي يعن للفكر هو : هل يجوز أن ننكمش هـذا الانكمـاش دون أن نشعر نـحن به ؟

والجواب : أنه لما كان هـذا الانكمـاش حادثـا لكـل جسـم مـن الأجسـام الموجـودة في مجموعتنـا فإنـه يسـتحيل علينـا أن نقـيس هـذا الانكمـاش أو نـحكم بوجوده لأن كـل مقيـاس نسـتخدمه للعثـور علـي هـذا الانكمـاش ينكمش هو ذاته . والغريـب في أمـر هـذا الانكمـاش أنـه تبـادلي . فالشـخص المتحرك بسرعة ٢٦٠ ألف كيلومتر في الثانية يظهر لنا منكمشا إلي نصـف طوله في اتجاه حركتها . فليست المسألة شبيهة " بجيليفر " وأهل " ليليبوت " حيث يظهر هو كبيرا بالنسـبة إلـيهم ويظهـرون هـم صـغيرون بالنسـبة إليه . بل علي العكس فكل يحقر من أمر صـاحبه كأنمـا ينظـر إليـه بمنظـار مقلوب .

* **تباطؤ الزمن :**

ولا يقف الخلاف بيننا وبين صديقنا علي الكوكب الآخر عند حد الأطوال . بل يتعدى ذلك إلي قياس الزمن فهو سينسب إلي حركاتنا بطؤا لا نعترف له به . فساعتنا تؤخر في نظره إذا قيست بساعته فيتحرك عقرباها حركة بطيئة بحيث يدور عقرب الدقائق دورة كاملة في ساعتين بدلا من ساعة واحدة . أما نحن فسنسب إليه نفس الشيء فنقول بتباطئه وتأخر ساعته . فتباطؤ الزمن كانكماش الطول تبادلي بيننا وبينه علي حد سواء .

وفي الفصل السابع من ذيل هذا الكتاب يجد القارئ المعادلات الرياضية لتباطؤ الزمن .

* **ثبوت " الفترة " والاختلاف علي الطول والزمن :**

والخلاف بين مشاهدين علي الطول وعلي الزمن في النظرية النسبية ناشئ عن أن كلا منهما يحلل الفترات بين الحوادث تحليلا يخالف تحليل الآخر . " فالفترة " بين حادثين هي كما قدمنا حقيقة مطلقة كالبعد بين النقطتين أ و ب في (شكل ٢) . أما تحليل هذه الفترة إلي عنصرين متعامدين [(أجـ١ . جـ١ب) أو (أجـ٢ . جـ٢ب)] وتسمية أحد هذين العنصرين زمانا والآخر مكانا فمسألة نسبية تختلف باختلاف حركة المشاهد . وثبوت " الفترة " هو الذي يحدد لنا العلاقة الكمية المضبوطة بين الزمنين والطولين في المجموعتين المختلفتين .

* **نسبية الحركة :**

ونسبية الزمان والمكان جديدة جاءت بها النظرية النسبية . أما نسبية الحركة فقديمةٌ تدخل في تعريف الحركة . وموضوع " الحركة النسبية " كما يسمي موضوع يدرس في أوليات علم الميكانيكا فسرعة تيار مائي في نهر بالنسبة إلي شاطئ النهر غير سرعته بالنسبة إلي مركَبٍ متحرك في الماء . والفرق بينهما ناشئ عن الحركة النسبية بين المركب والشاطئ . إلا أن الآراء الكلاسيكية السابقة لأينشتين كانت تجعل هذا الفرق مجرد إضافة

بسيطة يتبع فيها مبدأ معروف وهو مبدأ متوازي أضلاع السرعات . أما في النظرية النسبية فإن المسألة أعقد من ذلك . وفي الذيل الثامن من هذا الكتاب يجد القارئ تفصيلا لهذا البحث ، فالكميات التي تخضع لقانون الإضافة البسيطة ليست هي السرعات وإنما هي الظلال الزائدية العكسية لخارج قسمة هذا السرعات علي سرعة الضوء . وينتج من قانون تركيب السرعات في النظرية النسبية قانون " فرينل " لسرعة الضوء في وسط متحرك كما حققه "فيزو".

⋆ ظاهرة دوبلر والزيغ الفلكي :

وكما أن النظرية النسبية الخاصة تفسر قانون " فرينل " تفسيرا كميا مضبوطا فإنها تفسر كلا من ظاهرة " دوبلر " وظاهرة " الزيغ الفلكي ". ففي كل من هاتين الظاهرتين توجد مجموعتان بينهما سرعة نسبية إحداهما المجموعة التي يصدر عنها الضوء والأخري مجموعة المشاهد الذي يتلقى الضوء . ووجود حركة نسبية بين هاتين المجموعتين ينشأ عنه اختلاف علي معني الطول وعلي معني الزمن ، وبالتالي ينشأ عنه اختلاف علي طول الموجة وعدد الذبذبات في الثانية الواحدة ، واتجاه حركة الأمواج وبتطبيق معادلات "لورنتز" تنتج العلاقات الكمية المضبوطة بين المجموعتين ، ويجد القارئ تفصيل ذلك في الفصل العاشر من ذيل هذا الكتاب.

⋆ النسبية الخاصة وقوانين حركة الأجسام :

كان "السير إيزاك نيوتن"([1]) أول من صاغ القوانين الأساسية لعلم الديناميكا أو حركة الأجسام صياغة منطقية مضبوطة . ففي كتابه الذي ألفه باللاتينية المطبوع عام ١٦٨٦ والمعروف باسم "برينكيبيا"([2]) (أي الأصول) وضع نيوتن ثلاثة قوانين مشهورة لا تزال تعرف باسمه وتدرس في المدارس الثانوية([3]) .

([1]) Sir Isaac Newton

([2]) Prinicpia

([3]) انظر كتاب " الميكانيكا النظرية والعملية " تأليف مشرفة وعبد الرحمن كامل ص (٢٣٠) وما بعدها .

وقد قدم نيوتن لقوانينه بتعاريف تشبه من الناحية الشكلية تعاريف إقليدس في علم الهندسة . ولا بأس هنا من ذكر قوانين نيوتن الثلاثة لكي نتفهم كنه التعديلات التي أدخلتها عليها النظرية النسبية الخاصة . هذه القوانين هي :

القانون الأول : يبقي كل جسم علي حالة سكونه أو حركته المنتظمة في خط مستقيم إلا بالقدر الذي يجبر به علي تغيير هذه الحالة بتأثير قوي خارجية فيه .

القانون الثاني : التغير في الحركة متناسب مع القوة المحركة المؤثرة في الجسم . ويحدث في الخط المستقيم الذي تؤثر فيه هذه القوة .

القانون الثالث : لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومضاد له في الاتجاه .

وقد وضع نيوتن بهذه القوانين وبالتعاريف التي سبقتها أساس علم الديناميكا . وبقيت ديناميكية نيوتن بعيدة عن كل شك إلي أوائل القرن الحالي .

إلي أي حد تتأثر قوانين نيوتن بالنظرية النسبية الخاصة ؟

أما القانونان الأول والثالث فلا تمسهما النظرية النسبية ولا تتطلب تعديلا فيهما . وأما القانون الثاني فيتأثر بالنسبية الخاصة وإن كان هذا التأثر لا ينصب علي صيغة القانون بل علي معناه . فمعني القانون الثاني أن معدل التغير في كمية الحركة يتناسب مع القوة المحركة وباختيار وحدات ملائمة لقياس القوي . يتحول القانون إلي أن معدل التغير في كمية الحركة مساو للقوة المحركة . ويعرف نيوتن كمية الحركة بأنها حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته . وإلي هذا الحد لا تتطلب النسبية الخاصة أي تعديل في آراء نيوتن . إلا أن نيوتن يذهب إلي أبعد مما تقدم فيفترض أن لكل جسم كتلة ثابتة لا تتوقف علي حركته . وهذا الفرض هو الذي تتطلب النسبية الخاصة تعديله .

فالكتلة في نظر نيوتن هي كمية المادة التي يحتوي عليها الجسم . ولذلك فهو لم يتصور . ولم يكن من المعقول في عصره أن يتصور أن الكتلة بهذا المعني قد تتغير بتغير حركة الجسم .

والنظرية النسبية تسلم بأن لكل جسم كتلة خاصة به مادام الجسم ساكنا غير متحرك . أما إذا تحرك الجسم فإن كتلته تختلف عنها في حالة السكون . وبعبارة أخري تجعل النظرية النسبية كتلة الجسم كمية نسبية شأنها شأن طولها ؛ وكما أن طوله يختلف باختلاف سرعته بالنسبة إلي المجموعة التي يشاهد منها فكذلك كتلته تختلف باختلاف هذه السرعة .

وخلاصة القول إن النظرية النسبية الخاصة تترك القوانين الثلاثة لنيوتن كما هي ولكنها تخالف ديناميكية نيوتن في أن لكل جسم كتلة ثابتة . فتجعل الكتلة صفة نسبية للجسم يتوقف مقدارها علي سرعة الجسم بالنسبة إلي المجموعة التي يشاهد منها .

والسرعات اللازمة لإحداث تغير محسوس في مقدار الكتلة يجب أن تكون سرعات محسوسة إذا قيست بسرعة الضوء . وقد سبق القول بأن سرعاتنا الأرضية بل والسرعات الفلكية في المجموعة الشمسية تكاد لا تذكر إذا قيست بسرعة الضوء . وهذا الكلام صحيح من ناحية انطباقه علي الأجسام العادية التي نراها ونشاهدها حولنا . إلا أن هناك أجساما من نوع آخر لها سرعات محسوسة المقدار إذا قيست بسرعة الضوء . وهذه الأجسام هي الإلكترونات أو الكهارب التي تدخل في تركيب المادة والتي تنبعث من المواد ذات النشاط الإشعاعي كاليورانيوم والراديوم . فهذه الإلكترونات أو الكهارب كما سميت هي عبارة عن جسيمات صغيرة مشحونة شحنة كهربائية تنطلق من ذرات المواد بسرعات تصل إلي عشرات الألوف من الكيلومترات في الثانية الواحدة . ولما كانت هذه السرعات محسوسة إذا قيست بسرعة الضوء فقد كان من الطبيعي أن تجري التجارب علي هذه الجسيمات لقياس أثر هذه السرعات في كتلتها .

وقد قام " كاوفمان "[1] عام ١٩٠١ . و " بوشيرر "[2] عام ١٩٠٩ بإجراء تجارب دقيقة لقياس كتل الإلكترونات المتحركة بهذه السرعات العظيمة ومقارنة هذه الكتل بكتل الإلكترونات الساكنة . فجاءت تجاربهما معزز لآراء لورنتز و أبنشتين .

---

[1] فولتر كاوفمان : فيزيائي ألماني توفي في ١ يناير سنة ١٩٤٧ م .
[2] ألفريد بوشيرر : فيزيائي ألماني توفي في ١٦ أبريل سنة ١٩٢٧ م .

فالكتلة إذن صفة نسبية تزداد قيمتها بازدياد السرعة وهذا القول ليس مجرد فرض فلسفي بل هو حقيقة واقعة تعززها التجارب العلمية ، ويجد القارئ في الذيل الحادي عشر من هذا الكتاب البرهان النظري الذي استخدمه أينشتين عام ١٩٠٥ لإثبات تغير الكتلة بتغير السرعة .

*** الكتلة والطاقة :**

تعرف طاقة الحركة في ديناميكية نيوتن بأنها نصف حاصل ضرب الكتلة في مربع السرعة .

أما في النظرية النسبية الخاصة فإن تعريف الطاقة يختلف عن ذلك اختلافا يسترعي النظر . وفي الفصل الثاني عشر من ذيل هذا الكتاب يجد القارئ تعريف الطاقة المستمد من مبدأ النسبية الخاصة ، ويجد بمقارنة هذا التعريف بتعريف الكتلة أن بين الكتلة والطاقة تناسبا مطلقا .

فالطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء ، ومعني هذا أن عدد وحدات الطاقة لجسم متحرك أو ساكن يساوي دائما عدد وحدات كتلته مضروبا في عدد ثابت وهو مربع سرعة الضوء ، وبذلك يمكن التحويل من الطاقة إلي الكتلة وبالعكس كالتحويل من الأرطال إلي الجرامات وبالعكس ، فعدد الجرامات التي يحتوي عليها جسم من الأجسام يساوي دائما عدد الأرطال التي يحتوي عليها مضروبا في رقم ثابت (وهو ٤٤٩ تقريبا) . وكذلك عدد وحدات الطاقة التي يحتوي عليها جسم يساوي عدد وحدات كتلته مضروبا في عدد ثابت (وهو مربع سرعة الضوء) .

إزاء ذلك كان من الطبيعي أن يقول أينشتين بأن الطاقة والكتلة مقياسان لشيء واحد ، فالجسم الذي كتلته جرام يحتوي علي طاقة تقدر بخمسة وعشرين مليون كيلوات ساعة ، وعنصر الراديوم الذي تنبعث من طاقة بمعدل نحو ٣٠ ألف (كالوري) أو سُعر في الساعة عن كل جرام ذري منه (أي عن كل ٢٢٦ جرام من مادته) تفني مادته وبالتالي ينقص وزنه بمعدل ١،٢ ملليجرام في كل مائة سنة (انظر الفصل الثاني عشر من ذيل هذا الكتاب) .

الباب السادس

بعض النتائج الفلسفية للنظرية النسبية

لعل أعظم ما استرعي الانتباه من أمر النظرية النسبية هو نتائجها الفلسفية . فنسبية الزمان ونسبية المكان يرتبطان أوثق ارتباط بمعني الوجود كما يرتبط بنفس المعني نسبية الكتلة التي هي الكون المادي الذي اتخذ منه كثير من الفلاسفة المتأخرين أساسا لنظرية المعرفة عندهم .

ولعل من الخير هنا أن أبين أن المبحثين الرئيسيين في الفلسفة هما نظرية " الوجود " أو " الأونتولوجيا " ونظرية " المعرفة " أو " الأبيستومولوجيا " . فنظرية الوجود أو فلسفة الوجود هي البحث في كنه وجود الأشياء وحقيقتها بغرض الوصول إلي تحديد معني الوجود . ونظرية المعرفة أو فلسفة المعرفة هي البحث في طرائق الوصول إلي المعرفة البشرية وفي كنه هذه المعرفة والتمييز بين ما يصح وما لا يصح أن يُسمي بهذا الاسم .

وفلسفة الوجود وفلسفة المعرفة مبحثان متتامان رئيسيان من مباحث الفلسفة التي هي البحث عن الحقيقة . ومن ذلك يتضح لنا أن العلاقة وثيقة بين الفلسفة والعلم . بل إن العلم بالمعني الذي نفهمه في العصر الحالي لم يكن له وجود مستقل عن الفلسفة حتى نهاية العصور الوسطي وبدأ العصر الحديث في التاريخ . وقد بدأ العلم حياته المستقلة عقب النهضة الفكرية في أوروبا تحت اسم الفلسفة الجديدة أو الفلسفة التجريبية . وكان أساس هذه الفلسفة الجديدة الوصول إلي معرفة الحقيقة بطريق مباشرة وذلك بمشاهدة الكون وبإجراء التجارب التي تُنْبئنا عن طريق الحواس بحقائق الوجود .

وقد يظهر لنا اليوم أن هذه الطريقة بديهية في الوصول إلي المعرفة . إلا أن علينا أن نتذكر ما كانت عليه الأحوال في القرون الوسطي من سيطرة الكنيسة علي التفكير وما كان لأقوال رجال الدين من هيبة في النفوس وما كان من اضطهادهم لحرية الفكر .

فكل هذه الأمور قد ألقت ضغطا شديدا علي الفلسفة ونشأ عن الضغط انفجار عنيف أدي فيما أدي إلي نشوء العلم أو الفلسفة التجريبية .

ويمكن تعريف العلم بأنه المشاهدة الحسية والمنطق السليم مجتمعين . فالعلم يطلب المعرفة بطريقة واضحة لا يحيد عنها . أساسها المشاهدة وإجراء التجارب ثم استخدام التفكير المنظم لتمحيص نتائج المشاهدة والتجربة والوصول منها إلي الحقيقة . والخلاف الرئيسي بين العلم والفلسفة في القرون الوسطي إنما نشأ عن محاولة الكنيسة أن تفرض علي العلماء آراءها فرضا سواء اتفقت هذه الآراء مع المشاهد والمعقول أم لم تتفق . وقد نجح العلم منذ عصر النهضة إلي اليوم في توسيع نطاق المعرفة البشرية حتى لقد صار العلم والمعرفة مترادفين أو كادا يكونان كذلك . أما الفلسفة فقد تطورت هي أيضا متأثرة بانفصال العلم عنها فصارت أضيق تخصصا واتجهت نحو البحث في " الأونتولوجيا " أو نظرية " الوجود " و " الأبيستومولوجيا " أو نظرية " المعرفة " .

والمسألة الفلسفية الكبرى التي شغلت عقول الفلاسفة منذ فجر التاريخ إلي اليوم هي :

ما الحقيقة ؟ وما هي الأشياء التي نستطيع أن نجزم بأنها دون غيرها حقيقة ؟

ولكي نفهم أثر النظرية النسبية في تطور الفكر الفلسفي يجدر بنا أن نلقي نظرة علي الاتجاهات الرئيسية في الفلسفة قبل ظهور النظرية النسبية . ففي القرن التاسع عشر كان العلم قد أثبت نجاحَه في الكشف عن كثير من أسرار الكون الطبيعي وكان العلماء قد اهتدوا إلي صوغ القوانين الطبيعية صياغة إلي جانب عظيم من الدقة والإتقان. وكانت نتائج العلم قد تعدتْ ميدان الفكر إلي ميدان العمل فقام المخترعون والمهندسون بتطبيق الكشوف العلمية فسخروا قوي الطبيعة لخدمة الأغراض البشرية خيرِها وشرِها . وقد نشأ عن ذلك كله أن اهتم الناس بأمر العلم كما اهتم الفلاسفة بتفكير العلماء وصار للعلم أثرٌ واضح في توجيه الفكر الفلسفي .

وكان العلم في القرن الماضي يصورُ الكونَ علي أنه مؤلف من مادة ثابتةِ الكمية لا تتقبل الخلقَ ولا الفناء . وكانوا يعبرون عن ذلك بقانون عام هو قانون " بقاء المادة " أو عدم فنائها . فالمادة تتحول من مظهر إلي آخر . وهذا التحول إما أن يكون تحولا طبيعيا بسيطا أو تحولا كيميائيا تتفاعل فيه العناصر . وفي كلتا الحالتين تبقي كمية المادة أو كتلتها ثابتة لا يؤثر فيها التحول ولا يَزيد ولا يُنقص من قدرها .

ومن الأمثلة الكلاسيكية علي ذلك التجربة التي نجريها في مدارسنا اليوم للتدليل علي أنه إذا احترقت شمعة فإن مجموع أوزان المادة الناشئة عن الاحتراق يساوي وزن الشمعة مضافا إليه وزن الأوكسجين الذي يدخل في عملية الاحتراق . فإذا كان مجموع وزن الشمعة والأوكسجين يساوي ٥٠ جراما مثلا ثم احترقت الشمعة بأن اتحد الأوكسجين مع مادتها فإن نتائج الاحتراق وهي الدخان والغازات الناشئة عن هذا التفاعل الكيميائي يكون وزنها مساويا ٥٠ جراما بالضبط لا يقل عن ذلك ولا يزيد . ولمن شاء أن يتحقق من صحة ذلك باستخدام الموازين الكيميائية الدقيقة التي نستطيع باستخدامها التي نستطيع باستخدامها أن نزن الأجسام إلي أقل من جزء من ١٠ آلاف جزء من الجرام .

وما يقال عن احتراق الشمعة يقال عن كل تفاعل كيميائي أو طبيعي وبذلك تكون مادة الكون أزليةً غير قابلةٍ للخلق أو للفناء . وكان العلم في القرن الماضي يقول ببقاء المادة علي النحو الذي وصفته . وكان يقول أيضا ببقاء شيء آخر وهو الطاقة . والطاقة وإن لم تكن مادية في نظرهم إلا أنها جزء من الكون الطبيعي . فالحرارة والكهرباء والطاقة الميكانيكية الناشئة عن حركة الأجسام كل هذه جزء من الكون المحسوس وكلها مظاهر مختلفة من مظاهر الطاقة .

فالكون المحسوس إذن كان مؤلفا من شيئين هما المادة والطاقة وكل من هذين الشيئين له صفة البقاء يحدث له التحول ولكن لا يحدث له الفناء . والتحولُ الذي يحدث لكل من المادة والطاقة لا يحدث اعتباطا بل تنظمه قوانين هي القوانين الطبيعية . فحركات الأجسام المادية تنظمها قوانين نيوتن التي سبقت الإشارة إليها كما ينظمها قانون الجاذبية العام الذي يُقرن باسم نيوتن أيضا .

وقوانين نيوتن بما فيها قانون الجاذبية العام تنطبق علي حركات الأجرام السماوية في أفلاكها كما تنطبق علي حركات الأجسام الأرضية ، وباستخدام هذه القوانين تمكن علماء الفلك من حساب حركات الكواكب والمذنَّبات في المجموعة الشمسية بحيث صار في مقدورهم التنبؤُ بالحوادث الفلكية من كسوفٍ وخسوفٍ واقترانٍ ... الخ قبل وقوعها بسنتين وبدون أن يزيد الخطأ في حسابٍ ذلك عن جزء صغير الثانية الواحدة .

وبتطبيق قوانين الحركة تمكن المهندسون في القرن الماضي من حساب القوي البخارية ومن صنع الآلات الميكانيكية صنعا دقيقا محكما ، وكذلك الحال في أمر الحرارة والكهرباء والمغناطيسية والضوء ومرونة الأجسام وضغط السوائل . فالحرارة تنتقل من جسم إلي آخر طبقا لقوانين ثابتة وكذلك الكهرباء والمغناطيسية تنظمها معادلات صاغها " كلارك ماكسويل "[1] في أوائل النصف الثاني من القرن الماضي، وهي المعادلات التي سبقت الإشارة إليها . وكذلك الضوء ومرونة الأجسام وضغط السوائل كلها خاضعة لقوانين يصوغها العلم ويطبقها المهندسون والمخترعون فيصلون بذلك إلي تفهم حقيقة الكون وتسخير قوي الطبيعة .

ويمكن تشبيه الكون في نظر علماء القرن التاسع عشر بآلة عظيمة قوامها المادة والطاقة تعمل وفقا لنظم ثابتة هي القوانين الطبيعية ، وقد كان من الطبيعي أن تتأثر الفلسفة تأثرا عميقا بهذه الآراء العلمية فتغلبت النزعة المادية علي المذاهب الفلسفية وابتعد الفلاسفة عن المثالية وصارت نظرية الوجود في رأي الكثيرين منهم أساسها الوجود المادي . فقيل إن الحقيقةَ موضوعية أو خارجية بمعني أن الكون الحقيقي هو تلك الآلة العظيمة التي صورها العلم والتي هي منفصلةٌ عن أشخاصنا وخارجيةٌ بالنسبة إلينا . أما ما نُحس به فذلك مسألة نفسية أو شخصية تقوم بالنفس وتنشأ عن الحقيقة الخارجية التي هي الحقيقة الواقعية ، وبعبارة أبسط أنه في الواقع ونفس الأمر يوجد عالم خارجي . أما إحساسي وإدراكي لهذا العالم فمسألة شخصية ليست في صميم حقيقة هذا العالم .

وأكثر من ذلك . فالكون الحقيقي الموجود في الخارج إن هو إلا المادة والطاقة تنظمهما قوانين الطبيعة .

---

[1] Clerk Maxwell

والنتيجة المنطقية لهذا المذهب المادي أن يكون وجودنا نحن حقيقة مادية أيضا علينا أن نفسرها علي أساس المادة والطاقة والقوانين الطبيعية . وقد قام بعض الفلاسفة فعلا بتفسير الإحساس البشري والعواطف البشرية بل والتفكير البشري علي أنها جميعا تفاعلات كيميائية في خلايا المخ أو المخيخ أو غيرها من أجزاء الجهاز العصبي .

وقد حاول بعض الفلاسفة أن يتخذوا موقفا وسطا فأثبتوا حقيقة الوجود الخارجي ولكنهم جعلوا لهذا الوجود مقابلا نفسيا فكل حقيقة موضوعية موجودة في العالم الخارجي يقابلها أو يناظرها حقيقة نفسية ترتبط بها وتساويها وبذلك صارت الحقيقة مزدوجة أحد مظهريها موضوعي والآخر نفسي .

ولم يكن هناك خلاف جوهري بين الفلاسفة علي تعريف الوجود الخارجي . فالوجود الخارجي هو البقاء أو الاستمرار في الزمان والمكان . وكل وجود خارجي هو وجود في الزمان والمكان .

هكذا كان الحال بشكل عام عندما جاءت النظرية النسبية . وقد أتت هذه النظرية معدلةً للأساس الذي بُني عليه تعريف الوجود الخارجي . فالزمان والمكان لا حقيقة لهما في رأي أينشتين ومينكوفسكي أو علي الأقل لا حقيقة لكل منهما علي حدة . وينتج من ذلك أن الوجود في الزمان والمكان بالمعني الذي كان يفهمه فلاسفة القرن التاسع عشر لا حقيقة له .

والكون الخارجي الحقيقي الذي يقول به مينكوفسكي كون زماني مكاني يختلف مظهره باختلاف حركة المشاهد . وهذا الكون علي حقيقته ذو أربعة أبعاد . والفضاء ذو الأبعاد الثلاثة الذي تسبح فيه الأجرام الفلكية والذي نتصور أنه مكان الحقيقة الخارجية وهم من الأوهام . وكذلك تتابع الحوادث تتابعا زمنيا متصلا هذا أيضا مسألة خلافية . فحروب نابليون سابقة لحرب سنة ١٩١٤ بالنسبة إلينا نحن وقد تكون لاحقة لها في نظر غيرنا . والأدهي من ذلك أن المادة ذاتها وهي التي كانت غير قابلة للخلق ولا للفناء في نظر علماء القرن التاسع عشر فقد أزليتها وماديتها حتى إن الكيلوجرام قد صار مقدارا يختلف اثنان علي قيمته تبعا للسرعة النسبية بينهما .

من ذلك يتبين للقارئ أن النظرية النسبية قد قضت تماما علي الفلسفة المادية . فالوجود الخارجي في الزمان والمكان بالمعني الذي كان يُفهم لم يعد يصلح كتعريف للوجود لأن الزمان والمكان نفسهما لم يبق لكل منهما وجود منفصل كما أن الكون المادي لم يعد حقيقةً مجردة لأن المادة نفسها قد فقدت صفتها الرئيسية وهي البقاء .

وإذا كانت النظرية النسبية قد قضت علي الفلسفة المادية فما الذي أحلَّته محل هذه الفلسفة ؟

إن الزمان والمكان قد فقد كل منهما حقيقَته ومع ذلك فقد أحلت النظرية النسبية حقيقة أخري محلهما وهي الكون الزماني المكاني المؤلف منهما معا . وقد جعلت النظرية النسبية إحساسنا بهذا الكون إحساسا نسبيا ناقصا . أما إدراك الحقيقة كاملة فيستلزم الجمع بين وجهات النظر المختلفة في صورة معادلات رياضية . والمادة والطاقة قد صارا مظهرين لشيء واحد .

ومع أن النظرية النسبية تقول ببقاء هذا الشيء وعدم فنائه إلا أن هذا القول ينحصر في دائرة محددة من دوائر البحث . فالخلق والفناء خارجان عن نطاق النظرية النسبية . والذين يقولون بالنسبية لا يرتكبون الخطأ الذي ارتكبه علماء القرن الماضي وهو خطأ الجزم بشيء أو القول باستحالة شيء . وإن كانت هناك صفةٌ يتصف بها فلاسفة النسبية في البُعد عن إلقاء أي قولٍ فصلٍ في أية مسألة من المسائل التي يتعرضون لبحثها . وهناك صفة أخري ظاهرة في أبحاثهم وأقوالهم ألا وهي الاعتراف بحدود المباحث التي يتعرضون لها . فالسير " أرثر أدجتون "[1] مثلا وهو من زعماء النسبية يذكر في كتابه عن " كنه العالم الطبيعي "[2] أن العلوم الطبيعية محدودة في دائرة من دوائر المعرفة البشرية لا تخرج عنها ويترك الباب مفتوحا للوصول إلي المعرفة عن غير طريق العلم .

ومع أنني لم أتعرض في هذا الكتاب إلي النظرية النسبية العامة إلا أن ما ذكرتُه في هذا الباب ينطبق بصفةٍ عامة علي كل من النظرية النسبية الخاصة والنظرية النسبية العامة . ومن ميزات النظرية النسبية العامة

---

(1) Sir Arthur Eddington ، الفيلسوف والفلكي الإنجليزي الشهير ، توفي في ٢٢ نوفمبر سنة ١٩٤٤ م .

(2) انظر كتاب (The Nature of the Physical World) تأليف Sir Arthur Eddington .

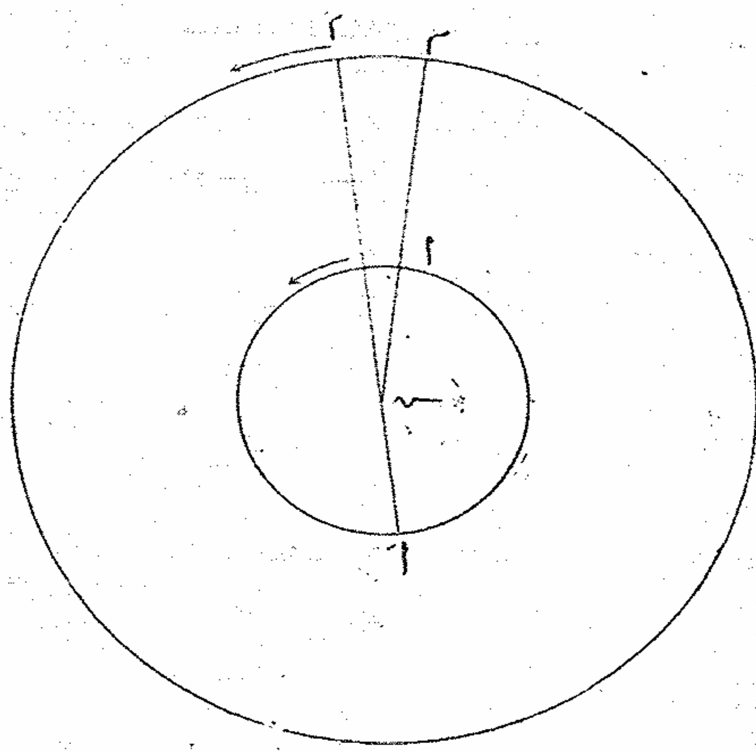
أنها تجعل الكون الزماني المكاني منحنيا أو مكورا بمثل ما يتكور سطح الكرة الأرضية في الفضاء . ولما كان الكون الزماني المكاني مؤلفا من أربعة أبعاد فإن تكوره يستلزم وجود أبعادٍ أخري كما يستلزم تكور سطح الكرة وهو سطح ذو بعدين وجود بعدٍ ثالث في الفضاء . ومعني هذا أن الكون المادي بأبعاده الأربعة لا يشمل الوجود كله بل إن هناك أبعادا أخري يختلف وجودُها في كنهه عن وجود الزمان ووجود المكان ووجود المادة . وقد بين السير " جيمس جينز "[1] في كتابه " الكون الغامض "[2] (ص ١٦٤ في الترجمة العربية) أن هذه الأبعاد الخارجة عن نطاق العالم المادي تعطي للفلسفة أساسا علميا للقول بوجود حقائقَ خارج نطاق الكون المادي .

([1]) Sir James Jeans ، فيزيائي ورياضياتي وفلكي إنجليزي توفي في ١٦ سبتمبر سنة ١٩٤٦ عن عمر يقارب ٦٩ عاما .
([2]) The Mysterious Universe ترجمة وزارة المعارف .

ذيل الكتاب

الفصل الأول

مشاهدة رومر وسرعة الضوء



(شكل ٤)

نفرض أن س هو موضع الشمس وأن ا ، م موضعا كل من الأرض

والمشترى على الترتيب عند ما يستقبل المشترى الشمس (أى عند ما يكونان فى ناحيتين متقابلتين أو متضادتين من السماء) .

فإذا دار المشترى فى فلكه فى إتجاه السهم كما هو مبين فى الشكل حتى وصل إلى نقطة مَ ودارت الأرض فى فلكها إلى نقطة اَ فإن الشمس تقترن بالمشترى (أى يوجدان فى نفس الموضع من السماء[1]) والمسافة التى يقطعها الضوء فى الحالة الأولى وهى حالة الاستقبال هى المسافة م ا .

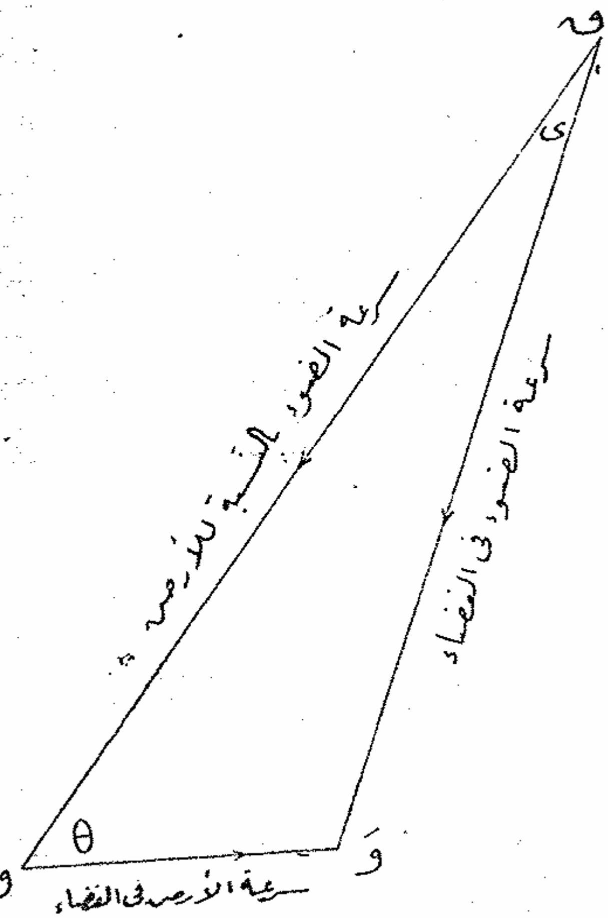
أما المسافة التى يقطعها الضوء فى الحالة الثانية وهى حالة الاقتران فهى المسافة مَ اَ . والفرق بين هاتين المسافتين يساوى قطر فلك الأرض . وقد وجد « رومر » أن الفرق بين الزمنين هو ٩٩٦ ثانية زمنية . وإذا استخدمنا نتيجة المشاهدات الحديثة فى هذا الزمن وهى ١٠٠٢ ثانية زمنية واعتبرنا بُعد الشمس عن الأرض ٩٣ مليون ميل فإن سرعة الضوء تساوى $\frac{٩٣ \times {}^{٦}١٠ \times ٢}{١٠٠٢}$ وهذا يساوى نحو ١٨٦ ألف ميل فى الثانية الواحدة . أو ما يعادل نحو ٣٠٠ ألف كيلو متر فى الثانية الواحدة .

---

(١) يلاحظ أن المشترى يدور دورة كاملة حول الشمس فى ٨٦ر١١ سنة .

الفصل الثانى

ظاهرة الزيغ الفلكى



(شكل ٥)

إذا كان ن وَ يمثل مقداراً واتجاها سرعة الضوء فى الفضاء وكان ن و يمثل مقداراً واتجاها أيضا سرعة الضوء بالنسبة للأرض (انظر شكل ٥) فإننا نعلم من مثلث السرعات أن و وَ يمثل سرعة الأرض فى الفضاء. وتكون الزاوية ىٰ هى زاوية الزيغ كما تكون الزاوية $\hat{\theta}$ هى زاوية ميل النجم الظاهرى على اتجاه حركة الأرض. ومن المثلث ن و وَ :

$$\frac{\text{و وَ}}{\text{ن وَ}} = \frac{\text{جا ى}}{\text{جا } \theta} \quad \ldots (1)$$

وإذا فرضنا أن سرعة الأرض فى الفضاء هى ع وسرعة الضوء فى الفضاء هى صه . فإن :

$$\frac{\text{و و}'}{\text{ن و}'} = \frac{\text{ع}}{\text{صه}} \quad \cdots \quad (٢)$$

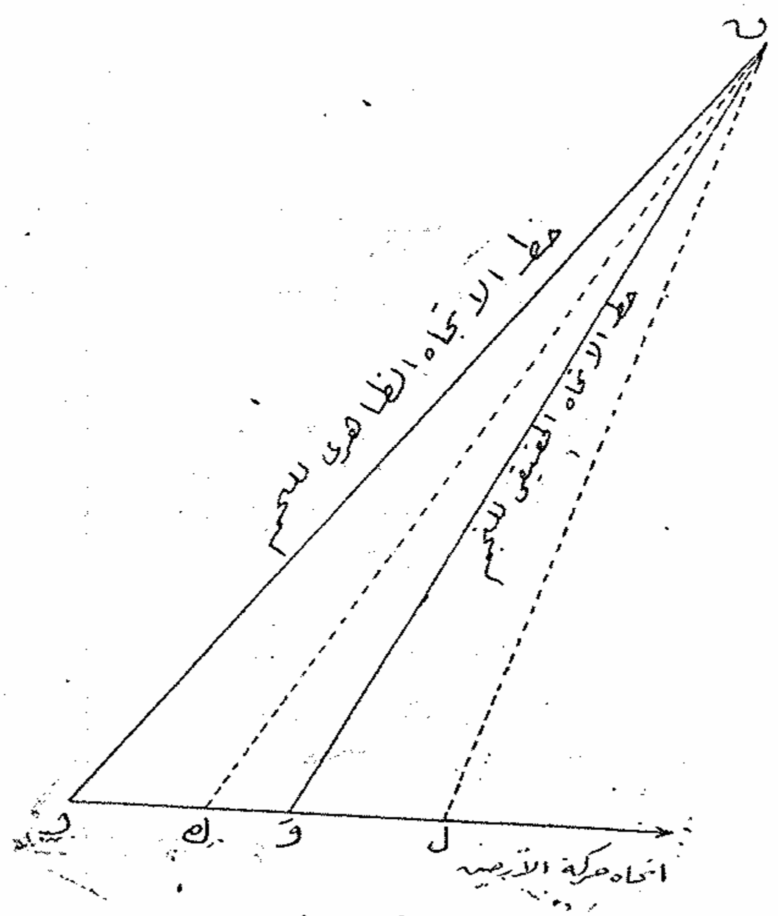
ومن (١) ، (٢) ينتج أن : $\text{حا } \hat{\text{ى}} = \frac{\text{ع}}{\text{صه}} \,.\, \text{حا } \hat{\theta} \quad \cdots \quad (٣)$

ولما كانت ع تساوى نحو ٣٠ كيلومتراً فى الثانية ، صه تساوى ٣٠٠ ألف كيلو متر فى الثانية فإن المقدار الثابت $\frac{\text{ع}}{\text{صه}}$ فى هـذه المعادلة يساوى ١٠$^{-٤}$.

وبذلك تكون أكبر قيمة للزيغ (وهى التى نحصل عليها بوضع $\text{حا } \hat{\theta} = ١$) مساوية ١٠$^{-٤}$ من الزوايا النصف القطرية . أو نحو ٢٠" ستينية .

الفصل الثالث

منظار « أيرى » المملوء بالماء وقانون « فرينل »



(شكل ٦)

نفرض أن نه و هو خط الاتجاه الظاهرى للنجم . فيكون نه و هو العمودى على سطح الماء الذى يملأ المنظار .

ونفرض أن ف و َ هو خط الإتجاه الحقيقي للنجم فيكون ه و َ هو إتجاه الشعاع الساقط على الماء .

ولنفرض أن ف ك هو إتجاه الشعاع المنكسر فتكون زاوية ف و و َ هى زاوية السقوط وتكون زاوية و ف ك هى زاوية الانكسار .

ومن قانون الانكسار :

حا و ه و َ = μ حا و ف ك . حيث μ معامل الانكسار .

ولما كانت و ه و َ صغيرة . فإن هـذه المعادلة يمكن كتابتها على الصورة .

زاوية و ه و َ = μ × زاوية و ه ك .

أو على الصورة : و و َ = μ . و ك ... (٤) .

فإذا فرضنا أن و و َ هى المسافة التى تقطعها عين الرائى بسبب حركة الأرض فى الزمن الذى يخترق فيه شعاع الضوء المنظار عندما يكون المنظار خالياً من الماء . وجب عند ما يكون المنظار مملوءاً بالماء أن تزداد المسافة التى تقطعها عين الرائى بنسبة زيادة الزمن اللازم للضوء لقطع المنظار فى هذه الحالة . أى بنسبة μ : ١ . وعلى ذلك تصل عين الرائى إلى نقطة مثل ل حيث :

و ل = μ . و و َ ... (٥) .

ولكى يصل الشعاع إلى عين الرائى أى إلى ل يجب أن نفترض أن الأثير تحرك من ك إلى ل فى نفس الزمن .

$$\therefore \frac{\text{سرعة الأثير}}{\text{سرعة الماء}} = \frac{\text{ك ل}}{\text{و ل}} = \frac{\text{و ل} - \text{و ك}}{\text{و ل}} = ١ - \frac{\text{و ك}}{\text{و ل}} \quad \ldots (٦)$$

وبالتعويض فى (٦) عن كل من و ك ، و ل من (٤) ، (٥) نحصل على :

$$\frac{\text{سرعة الأثير}}{\text{سرعة الماء}} = ١ - \frac{\frac{\text{و و}'}{\mu}}{\mu \,.\, \text{و و}'} = ١ - \frac{١}{\mu^{٢}}$$

وإذا كانت سرعة الماء تساوى ع فإن السرعة التى يكتسبها الأثير بسبب حركة الماء تساوى ع $\left(١ - \frac{١}{\mu^{٢}}\right)$.

ومعنى هذا أن :

سرعة الضوء فى الماء المتحرك = سرعته فى الماء الساكن + $\left(١ - \frac{١}{\mu^{٢}}\right)$ ع .

حيث ع سرعة الماء . وهذا هو قانون « فرينل » .

الفصل الرابع

تجربة ميكلسن ومورلى

نفرض أن $\text{ن}_{١}$ هو الزمن اللازم لقطع مسافة ف ذهاباً و إياباً فى الإتجاه الموازى لتيار الأثير .

ونفرض أن سرعة تيار الأثير هى ع . وسرعة المتحرك بالنسبة للأثير هى صہ . فتكون السرعة فى الذهاب (مع التيار) هى صہ + ع ، وفى الإياب صہ — ع .

$$\text{ن}_{١} = \frac{\text{ف}}{\text{صہ} + \text{ع}} + \frac{\text{ف}}{\text{صہ} - \text{ع}} = \frac{٢\,\text{صہ}\,\text{ف}}{\text{صہ}^{٢} - \text{ع}^{٢}} = \frac{\frac{٢\text{ف}}{\text{صہ}}}{١ - \frac{\text{ع}^{٢}}{\text{صہ}^{٢}}} \quad \cdots (٧) .$$

أما فى الإتجاه العمودى على التيار فإن السرعة فى كل من الذهاب والإياب $= \sqrt{\text{صہ}^{٢} - \text{ع}^{٢}}$ وذلك من مثلث السرعات الذى يكون مثلثا قائماً فى هـذه الحالة (انظر شكل ٧).

فإذا فرضنا أن $\text{ن}_{٢}$ هو الزمن اللازم فى هذه الحالة فإن :

$$\text{ن}_{٢} = \frac{٢\text{ف}}{\sqrt{\text{صہ}^{٢} - \text{ع}^{٢}}} = \frac{\frac{٢\text{ف}}{\text{صہ}}}{\sqrt{١ - \frac{\text{ع}^{٢}}{\text{صہ}^{٢}}}} \quad \cdots (٨) .$$

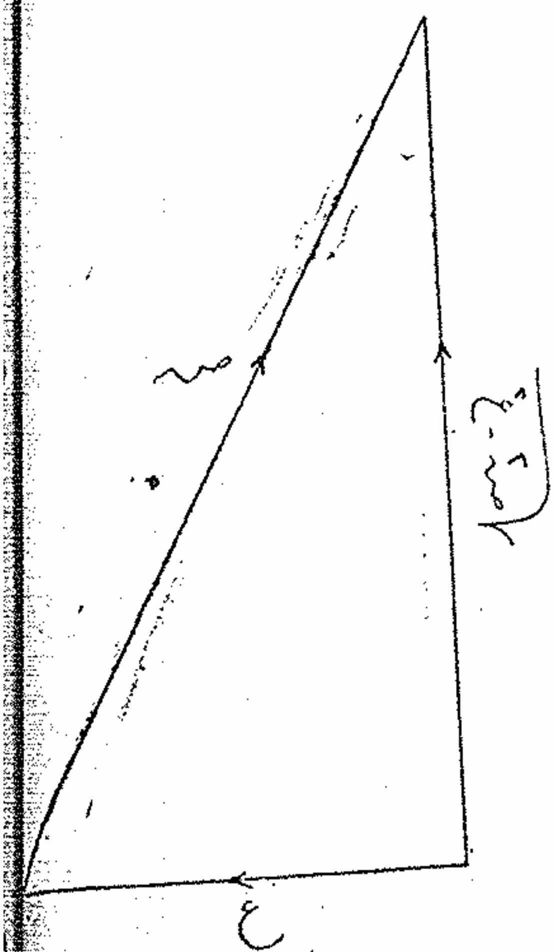
وبمقارنة (٧)، (٨) نجد أن :

$$ن_{1} > ن_{2}$$

ولكي يكون $ن_{1}$ مساويا $ن_{2}$ افترض «فيتزجرالد» أن المسافة ف ليست واحدة في الحالتين . وإذا جعلنا المسافة في الحالة الأولى $ف_{1}$ وفي الحالة الثانية $ف_{2}$ وجعلنا .

$$ف_{1} = ف_{2}\sqrt{1 - \frac{ع^{2}}{ص^{2}}}$$

فإن هذه المعادلة تعبر عن انكماش «فيتزجرالد» .



(شكل ٧)

الفصل الخامس

ظاهرة دوبلر

(أولا) إذا كان منبع الضوء متحركا نحو الرائي بسرعة تساوي ع وكانت ص هي سرعة الضوء في الفضاء . فإن طول الموجة يقصر بمقدار $\frac{ع}{ص}$ من طولها في حالة سكون المنبع . فإذا فرضنا أن λ هي طول الموجة في حالة الحركة ، $λ_{صفر}$ هي طول الموجة في حالة السكون .

$$\text{فإن : } λ = λ_{صفر} . \frac{ص - ع}{ص} \quad \cdots (٩)$$

وإذا كان المنبع مبتعداً عن الرائي بسرعة تساوي نفس المقدار فإن هذه المعادلة تكون صحيحة مع وضع + ع بدلا من — ع .

(ثانياً) إذا كان الرائي متحركا نحو المنبع فإنه يتلقى عدداً من الأمواج في وحدة الزمن يساوي $\frac{ص + ع}{ص}$ من عددها في حالة السكون . وإذن فإن طول الموجة يقصر بمقلوب هذه النسبة أي :

$$λ = λ_{صفر} . \frac{ص}{ص + ع} \quad \cdots (١٠)$$

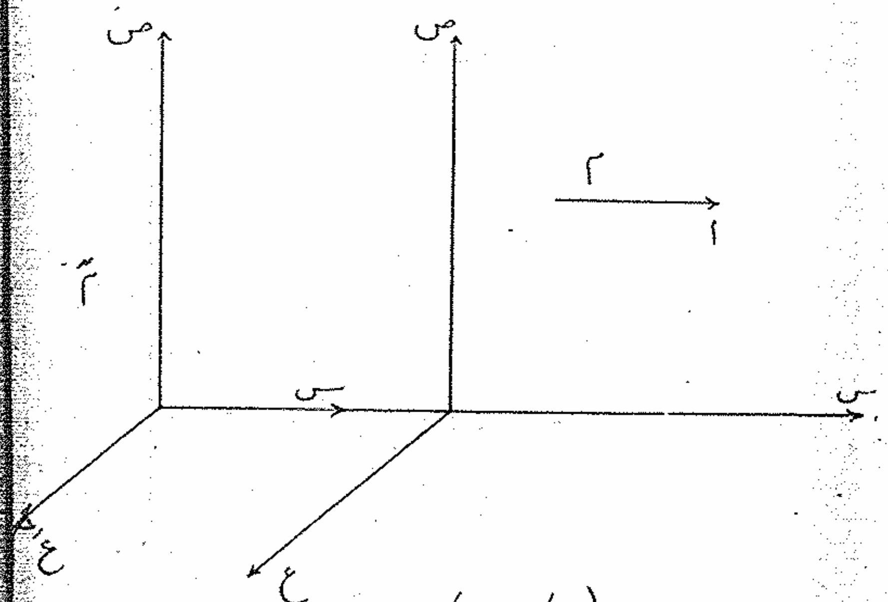
وإذا كان الرائي مبتعداً فإننا نكتب — ع بدلا من + ع في المعادلة (١٠) .

ويمكن بالتحليل الطيفي قياس سرعات اقتراب وابتعاد الأجرام السماوية بهذه الطريقة إلى درجة من الدقة تعادل نحو ربع ميل في الثانية .

الفصل السادس

معادلات لورنتز وثبوت سرعة الضوء

نفرض مجموعتين م ، مَ من الأحداثيات المتعامدة (كما هو مبين فى شكل ٨) . ونفرض أن المجموعة م متحركة فى إتجاه المحور السينى بسرعة



(شكل ٨)

تساوى أ بالنسبة إلى المجموعة مَ . ونعتبر معادلات « لورنتز » للتحويل بين المجموعتين . وهذه المعادلات هى :

$$سَ = \frac{س + أ ن}{\sqrt{1 - \frac{أ^2}{ص_o^2}}} \quad \ldots \ldots (11)$$

$$\text{ه}' = \frac{\text{ه} + \frac{\text{ا س}}{\text{صه}^{2}}}{\sqrt{1 - \frac{\text{ا}^{2}}{\text{صه}^{2}}}} \quad \cdots (12)$$

$$\left.\begin{array}{l} \text{ص}' = \text{ص} \\ \text{ع}' = \text{ع} \end{array}\right\} \quad \cdots \cdots (13)$$

فبالتفاضل نحصل على :

$$\left.\begin{array}{l} \text{ء س}' = \dfrac{\text{ء س} + \text{ا} \,.\, \text{ء ه}}{\sqrt{1 - \frac{\text{ا}^{2}}{\text{صه}^{2}}}} \quad \cdots \\[2em] \text{ء ه}' = \dfrac{\text{ء ه} + \frac{\text{ا}}{\text{صه}^{2}} \,.\, \text{ء س}}{\sqrt{1 - \frac{\text{ا}^{2}}{\text{صه}^{2}}}} \quad \cdots \end{array}\right\} (14)$$

$$\left.\begin{array}{l} \text{ء ص}' = \text{ء ص} \\ \text{ء ع}' = \text{ء ع} \end{array}\right\} \quad \cdots \cdots (15)$$

بفرض أن كلا من صه ، ا ثابت .

$$\therefore (\text{ء س}')^{2} + (\text{ء ص}')^{2} + (\text{ء ع}')^{2} - \text{صه}^{2} \,.\, (\text{ء ه}')^{2} =$$

$$\frac{(\text{ء س} + \text{ا} \,.\, \text{ء ه})^{2} - (\text{صه} \,.\, \text{ء ه} + \frac{\text{ا}}{\text{صه}} \,.\, \text{ء س})^{2}}{(1 - \frac{\text{ا}^{2}}{\text{صه}^{2}})} + (\text{ء ص})^{2} + (\text{ء ع})^{2}$$

$$= \frac{(\text{د س})^2 \left(1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{صـ}^2}\right) - \text{صـ}^2 . (\text{د ن})^2 \left(1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{صـ}^2}\right)}{\left(1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{صـ}^2}\right)} + (\text{د ص})^2 + (\text{د ع})^2$$

$$\therefore (\text{د س}')^2 + (\text{د ص}')^2 + (\text{د ع}')^2 - \text{صـ}^2 . (\text{د ن}')^2 = (\text{د س})^2$$
$$+ (\text{د ص})^2 + (\text{د ع})^2 - \text{صـ}^2 . (\text{د ن})^2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (16) .$$

فإذا كتبنا $(\text{د ف})^2 = (\text{د س})^2 + (\text{د ص})^2 + (\text{د ع})^2$.

و $(\text{د ف}')^2 = (\text{د س}')^2 + (\text{د ص}')^2 + (\text{د ع}')^2$.

فإن : $(\text{د ف}')^2 - \text{صـ}^2 . (\text{د ن}')^2 = (\text{د ف})^2 - \text{صـ}^2 . (\text{د ن})^2$.

فإذا كانت $\frac{\text{د ف}}{\text{د ن}} = \pm \text{صـ}$. فإن :

$\frac{\text{د ف}'}{\text{د ن}'} = \pm \text{صـ}$ أيضاً .

ومعنى هذا أن سرعة الضوء واحدة فى المجموعتين .

الفصل السابع

الانكماش الظاهرى للطول والتباطؤ الظاهرى للزمن

فى معادلات لورنتز (١١) ، (١٢) فى الفصل السابق نكتب :

$$\beta = \frac{\text{١}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ا}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}}} \quad \cdots (\text{١٧})$$

وبذلك يكون :

$$\left.\begin{array}{l} \text{سَ} = \beta\,(\text{س} + \text{ا}\,\text{ه}) \\ \text{،}\ \text{هَ} = \beta\,(\text{ه} + \frac{\text{ا}\,\text{س}}{\text{ص}^{\text{٢}}}) \end{array}\right\} \cdots (\text{١٨})$$

وبضرب طرفى المعادلة الأخيرة فى ا وطرحها من سابقتها نحصل على :

$$\text{سَ} - \text{ا}\,\text{هَ} = \beta\,\text{س}\,(\text{١} - \frac{\text{ا}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}) = \frac{\text{س}}{\beta}$$

$$\left.\begin{array}{l} \therefore\ \text{س} = \beta\,(\text{سَ} - \text{ا}\,\text{هَ}) \\ \text{وبالمثل}\ \text{ه} = \beta\,(\text{هَ} - \frac{\text{ا}\,\text{سَ}}{\text{ص}^{\text{٢}}}) \end{array}\right\} \cdots (\text{١٩})$$

ومن (١٨) ، (١٩) يتضح أن صيغة التحويل من المجموعة مَ إلى المجموعة م هى نفس صيغة التحويل من المجموعة م إلى المجموعة مَ مع كتابة — ا بدلا من + ا .

و إذا فرضنا عصاً متحركة مع المجموعة م بنفس سرعتها وكانت هذه العصا موازية لمحور السينات . ثم رصدنا طرفى هذه العصا من المجموعة م َ عند الزمن ن َ وكان الأحداثى السينى لأحد الطرفين هو س_1 ، للطرف الآخر س_2 فإننا نحصل من المعادلة الأولى فى (١٩) على :

$$\text{س}_1 = \beta\,(\text{س}'_1 - \text{ا}\,\text{ن}')$$

$$\text{،}\quad \text{س}_2 = \beta\,(\text{س}'_2 - \text{ا}\,\text{ن}')$$

وبالطرح $\text{س}_2 - \text{س}_1 = \beta\,(\text{س}'_2 - \text{س}'_1)$

وبوضع $\text{س}'_2 - \text{س}'_1 = \text{ل}'$ ، $\text{س}_2 - \text{س}_1 = \text{ل}$

ينتج أن :

$$\text{ل}' = \frac{\text{ل}}{\beta} = \text{ل}\sqrt{1 - \frac{\text{ا}^2}{\text{ص}^2}} \qquad (\text{ن}'\ \text{ثابت}) \cdots (٢٠)$$

وتعبر المعادلة (٢٠) عن الانكماش الظاهرى (انكماش فيتز جرالد) فى طول العصا . وإذا فرضنا أن عصا متحركة مع المجموعة م َ رصد طرفاها من المجموعة م عند الزمن ن فإننا نحصل من المعادلة الأولى فى (١٨) على :

$$\text{س}'_1 = \beta\,(\text{س}_1 + \text{ا}\,\text{ن})$$

$$\text{،}\quad \text{س}'_2 = \beta\,(\text{س}_2 + \text{ا}\,\text{ن})$$

ومنه $\text{س}'_2 - \text{س}'_1 = \beta\,(\text{س}_2 - \text{س}_1)$

أى : $$\text{ل} = \frac{\text{ل}'}{\beta} = \text{ل}'\sqrt{1 - \frac{\text{ا}^2}{\text{ص}^2}} \qquad (\text{ن}\ \text{ثابت}) \cdots (٢١)$$

وتعبر المعادلة (٢١) عن انكماش فيتز جرالد فى المجموعة م َ إذا رصدت من المجموعة م . وإذا فرضنا ساعة متحركة مع المجموعة م بنفس سرعتها وكان الأحداثى السينى لهذه الساعة فى المجموعة م هو س . ثم رصدت هذه الساعة من

المجموعة مَ فى زمنين مختلفين نَ_1 ، نَ_2 فإننا نحصل من المعادلة الثانية فى (١٩) على :

$$\text{نَ}_1 = \beta\left(\text{ن}_1 + \frac{\text{أ س}}{\text{ص}^2}\right)$$

$$\text{،}\quad \text{نَ}_2 = \beta\left(\text{ن}_2 + \frac{\text{أ س}}{\text{ص}^2}\right)$$

وبالطرح :

$$\therefore\ \text{نَ}_2 - \text{نَ}_1 = \beta\left(\text{ن}_2 - \text{ن}_1\right) = \frac{\text{ن}_2 - \text{ن}_1}{\sqrt{1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{ص}^2}}}\quad (\text{س ثابت})\quad (٢٢)$$

وتعبر هذه المعادلة عن تباطؤ زمن المجموعة م كما يظهر للمجموعة مَ . وبالمثل نحصل على :

$$\text{ن}_2 - \text{ن}_1 = \beta\left(\text{نَ}_2 - \text{نَ}_1\right) = \frac{\text{نَ}_2 - \text{نَ}_1}{\sqrt{1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{ص}^2}}}\quad (\text{سَ ثابت})\ \dots\ (٢٣)$$

التى تعبر عن تباطؤ زمن المجموعة مَ إذا رصدت من المجموعة م .

الفصل الثامن

تحويل السرعات وتحقيق قانون «فرينل»

إذا كتبنا :

$$\text{ر}'_{1} = \frac{\text{د س}'}{\text{د ن}'} \quad ، \quad \text{ر}'_{2} = \frac{\text{د ص}'}{\text{د ن}'} \quad ، \quad \text{ر}'_{3} = \frac{\text{د ع}'}{\text{د ن}'}$$

$$، \quad \text{ر}_{1} = \frac{\text{د س}}{\text{د ن}} \quad ، \quad \text{ر}_{2} = \frac{\text{د ص}}{\text{د ن}} \quad ، \quad \text{ر}_{3} = \frac{\text{د ع}}{\text{د ن}}$$

فإننا نحصل من (١٤) ، (١٥) على :

$$\text{ر}'_{1} = \frac{\text{د س} + \text{ا} \cdot \text{د ن}}{\text{د ن} + \frac{\text{ا}}{\text{ص}^{2}} \cdot \text{د س}} = \frac{\frac{\text{د س}}{\text{د ن}} + \text{ا}}{1 + \frac{\text{ا}}{\text{ص}^{2}} \cdot \frac{\text{د س}}{\text{د ن}}}$$

أى أن :

$$\text{ر}'_{1} = \frac{\text{ر}_{1} + \text{ا}}{1 + \frac{\text{ا} \cdot \text{ر}_{1}}{\text{ص}^{2}}} \quad .. \quad (23)$$

وكذلك نحصل من (١٥) ، (١٦) على :

$$\bar{\text{ع}}_{٢} = \frac{\text{د}\,\bar{\text{ص}}}{\text{د}\,\bar{\text{ن}}} = \frac{\text{د ص}}{\beta\left(\text{د ن} + \frac{١}{\text{ص}^{٢}}\,.\,\text{د س}\right)}$$

$$\text{أى}\quad \bar{\text{ع}}_{٢} = \frac{\text{ع}_{٢}}{\beta\left(١ + \text{ع}_{١}\,.\,\frac{١}{\text{ص}^{٢}}\right)} \quad \dots\ \dots\ (٢٤)$$

$$\text{وبالمثل}\quad \bar{\text{ع}}_{٣} = \frac{\text{ع}_{٣}}{\beta\left(١ + \text{ع}_{١}\,.\,\frac{١}{\text{ص}^{٢}}\right)} \quad \dots\ \dots\ (٢٥)$$

ومن ذلك يتضح أن نظرية متوازى أضلاع السرعات لا تكون صحيحة إلا على وجه التقريب (باعتبار $\frac{١}{\text{ص}}$ كمية صغيرة) . وينتج من المعادلة (٢٣) أنه إذا كانت :

$$\text{ع}_{١} = \text{ص}\ .\ \text{فإن}:\ \bar{\text{ع}}_{١} = \frac{\text{ص} + ١}{١ + \frac{١}{\text{ص}}} = \text{ص أيضاً}$$

أى أن كل سرعة تضاف إلى سرعة الضوء لا تؤثر فى قيمتها .

والمعادلة (٢٣) يمكن كتابتها فى صورة أخرى بالطريقة الآتية :

$$\text{نكتب}\quad \frac{\bar{\text{ع}}_{١}}{\text{ص}} = \text{الظل الزائدى للزاوية } \bar{\varphi} = \text{ظاز}\ \bar{\varphi}$$

$$،\quad \frac{\text{ع}_{١}}{\text{ص}} = \text{ظاز}\ \varphi$$

، $\text{ظا}\ \alpha = \dfrac{\text{ع}}{\text{ص}}$

فيكون $\text{ظا}\ \theta' = \dfrac{\text{ظا}\ \phi + \text{ظا}\ \alpha}{1 + \text{ظا}\ \phi\ \text{ظا}\ \alpha} = \text{ظا}\ (\phi + \alpha)$

$\therefore\ \phi' = \phi + \alpha \quad \cdots (٢٦)$

أو $\text{ظا}^{-1} \dfrac{\text{س}'_1}{\text{ص}} = \text{ظا}^{-1} \dfrac{\text{س}_1}{\text{ص}} + \text{ظا}^{-1} \dfrac{1}{\text{ص}}$

ومعنى هذا أن الظل الزائدى العكسى لخارج قسمة سرعة الجسم على سرعة الضوء هو الذى يتبع قانون الإضافة البسيطة .

وفى معادلة (٢٣) إذا وضعنا $\text{س}_1 = \dfrac{\text{ص}}{\mu}$ (حيث μ معامل الانكسار).

فإن : $\text{س}'_1 = \dfrac{\dfrac{\text{ص}}{\mu} + 1}{1 + \dfrac{1}{\text{ص}\mu}} = \left(\dfrac{\text{ص}}{\mu} + 1\right)\left(1 - \dfrac{1}{\text{ص}\mu}\right)$ تقريباً .

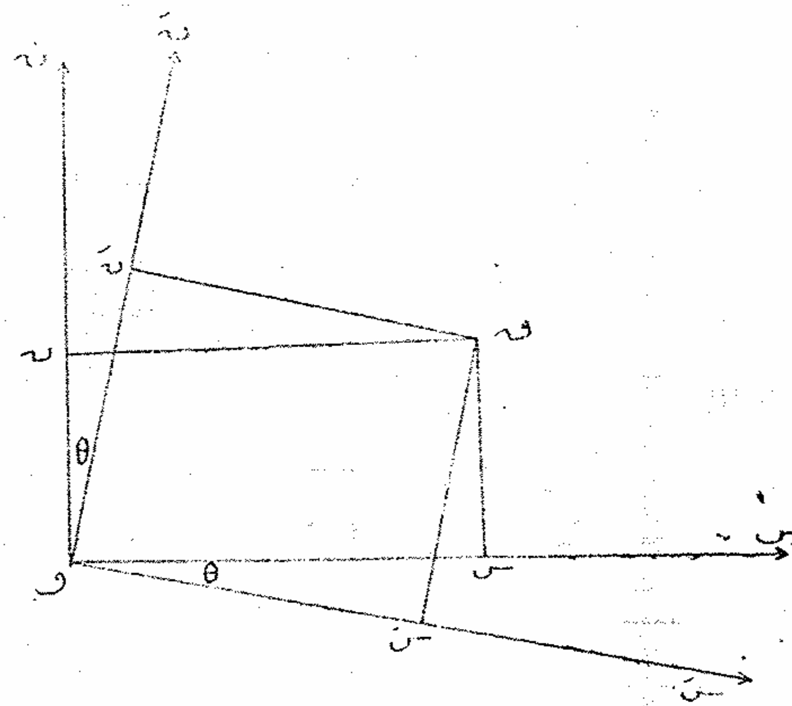
أ ، $\text{س}'_1 = \dfrac{\text{ص}}{\mu} + 1 \left(1 - \dfrac{1}{\mu^2}\right)$ تقريباً $\cdots (٢٧)$

وتعبر هذه المعادلة الأخيرة عن قانون « فرينل » عن سرعة الضوء فى وسط متحرك .

الفصل التاسع

معادلات لورنتز باستخدام زمن تخيلي

نفرض و س ، و ص محورين متعامدين ونرسم محورين آخرين متعامدين في نفس المستوى مارين بنقطة و وهما و سَ ، و صَ .



(شكل ٩)

ونفرض أن الزاوية بين و س ، و سَ هي θ . فتكون الزاوية بين و ص ، و صَ هي أيضاً θ (انظر شكل ٩) .

فإذا كان (س ، ص) أحداثيي نقطة في المستوى مثل ق منسوبين إلى

المحورين الأولين . وكان (س' ، ص') أحداثيي نفس النقطة فيه بالنسبة إلى المحورين الآخرين . فإن :

$$\left.\begin{aligned} \text{س}' &= \text{س حتا}\,\theta - \text{ص حا}\,\theta \\ \text{، ص}' &= \text{حتا}\,\theta + \text{س حا}\,\theta \text{ .} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\ \cdots\ (\text{٢٨})$$

وإذا وضعنا :

$$\left.\begin{aligned} \text{حتا}\,\theta &= \frac{\text{١}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ا}^{\text{٢}}}{\text{صه}^{\text{٢}}}}} \\ \text{، حا}\,\theta &= \frac{\frac{\text{١}}{\text{صه}}\sqrt{-\text{١}}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ا}^{\text{٢}}}{\text{صه}^{\text{٢}}}}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\ \cdots\ \cdots\ (\text{٢٩})$$

فإن المعادلتين (٢٨) تؤولان إلى :

$$\left.\begin{aligned} \text{س}' &= \frac{\text{س} - \sqrt{-\text{١}}\cdot\frac{\text{١}}{\text{صه}}\cdot\text{ص}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ا}^{\text{٢}}}{\text{صه}^{\text{٢}}}}} \\ \text{، ص}' &= \frac{\text{ص} + \text{س}\cdot\frac{\text{١}}{\text{صه}}\sqrt{-\text{١}}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ا}^{\text{٢}}}{\text{صه}^{\text{٢}}}}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\ \cdots\ (\text{٣٠})$$

وفى هاتين المعادلتين الأخيرتين إذا استخدمنا ه ، هَ بدلا من ن ، نَ حيث :

$$\left.\begin{aligned} \text{ه} &= \text{ن} \,.\, \frac{-\sqrt{-1}}{\text{ص}} \\ \text{وبالمثل}\quad \text{هَ} &= \text{نَ} \,.\, \frac{-\sqrt{-1}}{\text{ص}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (\text{٣١})$$

فإن المعادلتين (٣٠) تؤولان إلى

$$\left.\begin{aligned} \text{سَ} &= \frac{\text{س} + \text{أ}\,\text{ه}}{\sqrt{1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{ص}^2}}} \\ \text{،}\quad \text{هَ} &= \frac{\text{ه} + \frac{\text{أ}\,\text{س}}{\text{ص}^2}}{\sqrt{1 - \frac{\text{أ}^2}{\text{ص}^2}}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (\text{٣٢})$$

وهاتان المعادلتان هما معادلتا « لورنتز » [انظر المعادلتين (١١) ، (١٢)] .

ومن المعادلة (٣١) نحصل على :

$$\text{ن} = \sqrt{-1} \,.\, \text{ص}\, \text{ه}$$

$$\text{وكذلك}\quad \text{نَ} = \sqrt{-1} \,.\, \text{ص}\, \text{هَ}$$

$$\left.\begin{aligned} \therefore\quad \text{ن}^2 &= -\,\text{ص}^2\, \text{ه}^2 \\ \text{،}\quad \text{نَ}^2 &= -\,\text{ص}^2\, \text{هَ}^2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (\text{٣٣})$$

وعلى ذلك فإن : $(\text{ءس})^2 + (\text{ءص})^2 + (\text{ءع})^2 - \text{ص}^2 \,.\, (\text{ءه})^2$

$= (\text{ءس})^2 + (\text{ءص})^2 + (\text{ءع})^2 + (\text{ءن})^2$.

وكذلك : $(\text{د س}')^{2} + (\text{د ص}')^{2} + (\text{د ع}')^{2} - \text{ص}^{2} . (\text{د ن}')^{2}$

$$= (\text{د س}')^{2} + (\text{د ص}')^{2} + (\text{د ع}')^{2} + (\text{د ه}')^{2} .$$

وعلى ذلك فالمعادلة (١٦) على (ص ٦٤) التى تعبر عن ثبوت « الفترة » يمكن كتابتها على الصورة :

$$(\text{د س}')^{2} + (\text{د ص}')^{2} + (\text{د ع}')^{2} + (\text{د ه}')^{2} = (\text{د س})^{2} + (\text{د ص})^{2} + (\text{د ع})^{2} + (\text{د ه})^{2} .$$

ويلاحظ أننا إذا اعتبرنا ن ، ن' حقيقيين فإن المعادلتين (٣١) تدلان على أن :

ه ، ه' تخيليان .

ومن المعادلتين (٢٩) ينتج أن :

$$\text{ظا } \theta = \frac{1}{\text{ص}} . \sqrt{-1} \quad \dots \quad \dots \quad (٣٤)$$

وعلى ذلك يمكن اعتبار معادلتى « لورنتز » على أنهما معادلتا تحويل ناشئتان عن دوران المحورين بزاوية تخيلية بشرط استخدام زمن تخيلى ه بدلا من الزمن الحقيقى ن .

الفصل العاشر

تحقيق ظاهرتى دوپلر والزيغ الفلكى

نفرض شعاعاً متوازياً من الضوء متحركاً فى الفضاء فى الاتجاه (ك ، ل ، م) حيث ك ، ل ، م جيوب تمام إتجاه الشعاع منسوبة إلى ثلاثة محاور متعامدة . وبالرجوع إلى كتب البصريات الطبيعية[1] يجد القارئ أن المتجه الضوئى فى هذا الشعاع يمكن التعبير عنه بالطريقة الآتية :

$$\text{المتجه الضوئى} = \text{ثابت} \times \text{حتا}\ \omega \left(\text{ن} - \frac{\text{ك س} + \text{ل ص} + \text{م ع}}{\text{صه}} \right) \cdots (٣٥)$$

$$\text{حيث}\quad \omega = ٢\ \text{ط}\ \nu = \frac{٢\ \text{ط}}{\lambda}\ .\ \text{صه} \cdots (٣٦)$$

بفرض أن ν عدد الذبذبات فى الثانية ، λ طول الموجة ، صه سرعة الضوء فى الفضاء .

فإذا طبقنا معادلات « لورنتز » للتحويل من المجموعة غير المشروطة إلى المجموعة المشروطة وهى المعادلات (١٣) ، (١٩) (انظر ص ٦٣ ، ٦٥) فإننا نحصل على :

$$\text{المتجه الضوئى فى المجموعة المشروطة} = \text{ثابت} \times \text{حتا}\ \omega\beta \left[\text{نَ} - \frac{\text{ا سَ}}{\text{صه}^{٢}} - \frac{\text{ك}}{\text{صه}} (\text{سَ} - \text{ا نَ}) - \frac{\text{ل}}{\beta\ \text{صه}} .\ \text{صَ} - \frac{\text{م}}{\beta\ \text{صه}} .\ \text{عَ} \right]$$

$$= \text{ثابت} \times \text{حتا}\ \omega\beta \left[\text{نَ} \left(١ + \frac{\text{ك ا}}{\text{صه}}\right) - \frac{\text{سَ}}{\text{صه}} \left(\text{ك} + \frac{\text{ا}}{\text{صه}}\right) - \frac{\text{ل صَ}}{\beta\ \text{صه}} - \frac{\text{م عَ}}{\beta\ \text{صه}} \right]$$

(١) انظر مثلا كتاب A Treatise on Light تأليف R. A. Houston طبعة سنة ١٩١٩ ص ٤٠٣

$$= \text{ثابت} \times \text{حتا}\, \omega\, \beta \left(1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}\right) \left[\text{ن}' - \frac{\text{س}'}{\text{صه}} \cdot \frac{\text{ك} + \frac{1}{\text{صه}}}{1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}} \right.$$

$$\left. - \frac{\text{ص}'}{\beta\,\text{صه}} \cdot \frac{\text{ل}}{1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}} - \frac{\text{ع}'}{\beta\,\text{صه}} \cdot \frac{\text{م}}{1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}} \right]$$

$$= \text{ثابت} \times \text{حتا}\, \omega' \left[\text{ن}' - \frac{\text{ك}'\text{س}' + \text{ل}'\text{ص}' + \text{م}'\text{ع}'}{\text{صه}} \right]$$

حيث :

$$\text{ك}' = \frac{\text{ك} + \frac{1}{\text{صه}}}{1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}}$$

$$\text{،}\ \text{ل}' = \frac{\text{ل}}{\beta\left(1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}\right)} \qquad \ldots \ldots \ (٣٧)$$

$$\text{،}\ \text{م}' = \frac{\text{م}}{\beta\left(1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}\right)}$$

$$\text{،}\ \omega' = \beta \left(1 + \frac{\text{ك}\,\text{أ}}{\text{صه}}\right) \omega \qquad \ldots \ldots \ (٣٨)$$

وتدل المعادلات (٣٧) على العلاقة بين إتجاه الشعاع فى المجموعة المشروطة الذى يتحدد بجيوب تمام الاتجاه ك َ ، ل َ ، م َ و بين إتجاه الشعاع فى المجموعة

غير المشروطة ، وهو الذى يتحدد بجيوب تمام الاتجاه ك ، ل ، م . أما المعادلة (٣٨) . فيمكن كتابتها على الصورة :

$$\gamma' = \beta\left(1 + \frac{\text{ك}^{\text{م}}}{\text{ص}}\right)\gamma \quad \cdots\ \cdots \quad (٣٩)$$

حيث
$$\gamma' = \frac{\omega'}{٢\,\text{ط}} \quad \cdots\ \cdots \quad (٤٠)$$

والمعادلة (٣٩) تعطينا العلاقة بين عدد الذبذبات فى الثانية فى المجموعة غير المشروطة وعددها فى المجموعة المشروطة .

وإذا وضعنا ك = ١ فى المعادلة (٣٩) فإننا نحصل على :

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{1 + \frac{\text{م}}{\text{ص}}}{\sqrt{1 - \frac{\text{م}^2}{\text{ص}^2}}} = 1 + \frac{\text{م}}{\text{ص}} \text{ تقريباً } = \frac{1}{1 - \frac{\text{ا}}{\text{ص}}} \text{ تقريباً}$$

وإذا استخدمنا الطول الموجي λ' حيث :

$$\lambda' \cdot \gamma' = \text{ص} \quad \cdots\ \cdots \quad (٤١)$$

فإننا نحصل على :

$$\left.\begin{aligned} \lambda' &= \lambda\left(\frac{\text{ص} - \text{ا}}{\text{ص}}\right) \text{ تقريباً} \\ \text{وكذلك}\quad \lambda' &= \lambda\left(\frac{\text{ص}}{\text{ص} + \text{ا}}\right) \text{ تقريباً} \end{aligned}\right\} \cdots \quad (٤٢)$$

وبمقارنة هاتين المعادلتين بالمعادلتين (٩) ، (١٠) (انظر ص ٦١) نجد أنهما يحققان ظاهرة دوبلر .

ولتحقيق ظاهرة الزيغ الفلكي نضع في المعادلات (٣٧) .

$$\left.\begin{array}{l} \text{ل} = \text{حتا}\,\Phi \\ \text{،}\ \ \text{ل}' = \text{حتا}\,\Phi' \end{array}\right\} \cdots (\text{٤٣})$$

فيكون :

$$\text{حتا}\,\Phi' = \frac{\text{حتا}\,\Phi + \frac{1}{\text{ص}}}{1 + \frac{1}{\text{ص}}\,.\,\text{حتا}\,\Theta} = \left(\text{حتا}\,\Phi + \frac{1}{\text{ص}}\right)\left(1 - \frac{1}{\text{ص}}\,.\,\text{حتا}\,\Phi\right)\ \text{تقريباً}$$

$$= \text{حتا}\,\phi + \frac{1}{\text{ص}}\left(1 - \text{حتا}^{2}\,\phi\right)\ \text{تقريباً}$$

$$\text{أي}\quad \text{جتا}\,\Phi' = \text{حتا}\,\phi + \frac{1}{\text{ص}}\,.\,\text{حا}^{2}\,\phi\ \ \text{تقريباً} \cdots (\text{٤٤})$$

$$\text{فاذا فرضنا أن}\qquad \Phi' = \Phi - \text{ى}$$

$$\text{بحيث يكون}\qquad \text{حتا}\,\Phi' = \text{حتا}\,\Phi\ \text{حتا ى} + \text{حا}\,\Phi\ \text{حا ى}$$

$$\text{وأن}\qquad \text{جتا}\,\Phi' = \text{جتا}\,\Phi + \text{حا}\,\Phi\ \text{حا ى}\ \ \text{تقريباً}\ (\text{٤٥})$$

وبمقارنة (٤٤) ، (٤٥) نحصل على :

$$\text{حا ى} = \frac{1}{\text{ص}}\,.\,\text{حا}\,\phi \cdots \cdots (\text{٤٦})$$

وهذه هي معادلة الزيغ الفلكي التي سبق الحصول عليها (قارن المعادلة (٣) على ص ٥٥) .

الفصل الحادى عشر

معادلة حركة جسم كتلة سكونه ك

نفرض جسما كتلته ك فى المجموعة م (انظر شكل ٩) تؤثر فيه قوة ق فتكون معادلة حركته طبقاً للقانون الثانى لنيوتن هى :

$$\text{ك} \cdot \frac{\text{د}^2\text{س}}{\text{د}\text{ن}^2} = \text{ق} \quad \ldots \ldots \ldots (٤٧)$$

ولما كانت $\frac{\text{دس}}{\text{دن}}$ هى السرعة $\text{ع}_\text{س}$ فى المجموعة م فى الاتجاه السينى

و كانت $\frac{\text{دس}'}{\text{دن}'}$ هى السرعة $\text{ع}'_\text{س}$ فى المجموعة م' . فإن

$$\frac{\text{دس}}{\text{دن}} = \frac{\frac{\text{دس}'}{\text{دن}'} - \text{ا}}{١ - \frac{\text{ا}}{\text{ص}^2} \cdot \frac{\text{دس}'}{\text{دن}'}}$$

وبمفاضلة طرفى هذه المعادلة نحصل على :

$$\frac{\text{د}^2\text{س}}{\text{د}\text{ن}^2} = \frac{\text{د}}{\text{دن}} \left(\frac{\frac{\text{دس}'}{\text{دن}'} - \text{ا}}{١ - \frac{\text{ا}}{\text{ص}^2} \cdot \frac{\text{دس}'}{\text{دن}'}} \right) = \frac{\text{دن}'}{\text{دن}} \cdot \frac{\text{د}}{\text{دن}'} \left(\frac{\frac{\text{دس}'}{\text{دن}'} - \text{ا}}{١ - \frac{\text{ا}}{\text{ص}^2} \cdot \frac{\text{دس}'}{\text{دن}'}} \right)$$

$$= \frac{١}{\frac{\text{دن}}{\text{دن}'}} \cdot \frac{\text{د}}{\text{دن}'} \left(\frac{\frac{\text{دس}'}{\text{دن}'} - \text{ا}}{١ - \frac{\text{ا}}{\text{ص}^2} \cdot \frac{\text{دس}'}{\text{دن}'}} \right)$$

$$= \frac{\text{ك} \cdot \frac{d\bar{\text{ع}}}{d\bar{\text{ز}}}}{\left(1 - \frac{\bar{\text{ع}}^{2}}{\text{ص}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

فإن المعادلة (٥٠) يمكن كتابتها على الصورة :

$$\frac{d}{d\bar{\text{ز}}}\left(\frac{\text{ك}\ \bar{\text{ع}}}{\sqrt{1 - \frac{\bar{\text{ع}}^{2}}{\text{ص}^{2}}}}\right) = \bar{\text{ق}} \quad \ldots \ldots \text{(٥١)}$$

أى أن معدل التغير فى كمية الحركة يساوى القوة بشرط اعتبار أن :

$$\text{الكتلة} = \frac{\text{ك}}{\sqrt{1 - \frac{\bar{\text{ع}}^{2}}{\text{ص}^{2}}}} \quad \ldots \ldots \ldots \text{(٥٢)}$$

الفصل الثانى عشر

العلاقة بين الطاقة والكتلة

$$\frac{\text{ء}}{\text{ء}\,\text{س}}\left(\frac{\text{ك}\,\text{صه}^{2}}{\sqrt{1-\frac{\text{ر}^{2}}{\text{صه}^{2}}}}\right) = \frac{\text{ك}\,\text{ر}\cdot\frac{\text{ء}\,\text{ر}}{\text{ء}\,\text{س}}}{\left(1-\frac{\text{ر}^{2}}{\text{صه}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\text{ك}\cdot\frac{\text{ء}\,\text{س}}{\text{ء}\,\text{ن}}\cdot\frac{\text{ء}\,\text{ر}}{\text{ء}\,\text{س}}}{\left(1-\frac{\text{ر}^{2}}{\text{صه}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$= \frac{\text{ك}\cdot\frac{\text{ء}\,\text{ر}}{\text{ء}\,\text{ن}}}{\left(1-\frac{\text{ر}^{2}}{\text{صه}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}} = \text{ق}$$

$$\therefore \frac{\text{ك}\,\text{صه}^{2}}{\sqrt{1-\frac{\text{ر}^{2}}{\text{صه}^{2}}}} = \int \text{ق}\,.\,\text{ء}\,\text{س} = \text{الشغل}$$

وعلى ذلك يكون :

$$\frac{\text{ك}\,\text{صه}^{2}}{\sqrt{1-\frac{\text{ر}^{2}}{\text{صه}^{2}}}} = \text{الطاقة} \quad \dots \quad \dots \quad (٥٣)$$

وبمقارنة المعادلة (٥٣) بالمعادلة (٥٢) يتضح أن الطاقة متناسبة مع الكتلة وأن معامل التناسب هو صه^{2} .

ولحساب الطاقة المدخرة فى جرام واحد من المادة نضع فى المعادلة (٥٣) .

$\text{ك} = ١$ ، $\text{ر} = \text{صفر}$ فتكون :

$$= \frac{\sqrt{1-\frac{ا^2}{ص^2}}}{1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}} \cdot \frac{ى}{ى ن'}\left(\frac{\frac{ى س'}{ى ن'}-ا}{1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}}\right)$$

$$= \frac{\sqrt{1-\frac{ا^2}{ص^2}}}{1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}} \cdot \frac{ى}{ى ن'}\left(\frac{\frac{ى س'}{ى ن'}-ا}{1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}}\right)$$

$$= \frac{\sqrt{1-\frac{ا^2}{ص^2}}}{1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}}\left[\frac{\frac{ى^2 س'}{ى ن'^2}}{1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}} + \frac{\frac{ى^2 س'}{ى ن'^2}\cdot\frac{ا}{ص^2}\left(\frac{ى س'}{ى ن'}-ا\right)}{\left(1-\frac{ا}{ص^2}\cdot\frac{ى س'}{ى ن'}\right)^2}\right]$$

فإذا فرضنا أن جسما فى اللحظة التى نعتبره فيها كان ساكنا سكونا لحظيا بالنسبة إلى المجموعة م فإن سرعته فى هذه اللحظة بالنسبة إلى المجموعة مَ تساوى ا .

وبوضع :

$\frac{ى س'}{ى ن'} = ا$ فيما تقدم نحصل على :

$$\frac{ى^2 س}{ى ن^2} = \frac{\sqrt{1-\frac{ا^2}{ص^2}}}{\left(1-\frac{ا^2}{ص^2}\right)^2} \cdot \frac{ى^2 س'}{ى ن'^2} = \frac{1}{\left(1-\frac{ا^2}{ص^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{ى^2 س'}{ى ن'^2} \quad \dots (٤٨)$$

وبالتعويض من (٤٨) فى (٤٧) نحصل على معادلة الحركة فى المجموعة مَ على الصورة :

$$\frac{\text{ك}}{\left(1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}}\cdot\frac{\text{د}^{2}\text{س}}{\text{د}\text{ن}^{2}}=\text{ق}\quad\cdots\quad\cdots\quad(٤٩)$$

وإذا كتبنا :

$$\frac{\text{د}\text{س}}{\text{د}\text{ن}}=\text{ع}$$

حيث ع سرعة الجسم بالنسبة للمجموعة م فإن المعادلة (٤٩) يمكن كتابتها على الصورة :

$$\frac{\text{ك}\cdot\frac{\text{د}\text{ع}}{\text{د}\text{ن}}}{\left(1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}}=\text{ق}\quad\cdots\quad\cdots\quad(٥٠)$$

وإذا لاحظنا أن :

$$\frac{\text{د}}{\text{د}\text{ن}}\left(\frac{\text{ك}\,\text{ع}}{\sqrt{1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}}}\right)=\frac{\text{ك}\cdot\frac{\text{د}\text{ع}}{\text{د}\text{ن}}}{\sqrt{1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}}}+\frac{\text{ك}\,\text{ع}\cdot\frac{\text{ع}}{\text{ص}^{2}}\cdot\frac{\text{د}\text{ع}}{\text{د}\text{ن}}}{\left(1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$=\frac{\text{ك}\cdot\frac{\text{د}\text{ع}}{\text{د}\text{ن}}}{\left(1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}}\left(1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}+\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}\right)$$

$$= \frac{\text{ك} \cdot \dfrac{\text{د}\text{ع}}{\text{د}\text{ن}}}{\left(1 - \dfrac{\text{ع}^2}{\text{ص}^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

فإن المعادلة (٥٠) يمكن كتابتها على الصورة :

$$\frac{\text{د}}{\text{د}\text{ن}}\left(\frac{\text{ك}\ \text{ع}}{\sqrt{1 - \dfrac{\text{ع}^2}{\text{ص}^2}}}\right) = \text{ق} \quad \cdots\ \cdots \quad (٥١)$$

أى أن معدل التغير فى كمية الحركة يساوى القوة بشرط اعتبار أن :

$$\text{الكتلة} = \frac{\text{ك}}{\sqrt{1 - \dfrac{\text{ع}^2}{\text{ص}^2}}} \quad \cdots\ \cdots\ \cdots \quad (٥٢)$$

الفصل الثاني عشر

العلاقة بين الطاقة والكتلة

$$\therefore \frac{\text{ء}}{\text{ء س}}\left(\frac{\text{ك ص}^{\text{٢}}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ع}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}}}\right) = \frac{\text{ك ع} \cdot \frac{\text{ء ع}}{\text{ء س}}}{\left(\text{١} - \frac{\text{ع}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}\right)^{\frac{\text{٣}}{\text{٢}}}} = \frac{\text{ك} \cdot \frac{\text{ء س}}{\text{ء ن}} \cdot \frac{\text{ء ع}}{\text{ء س}}}{\left(\text{١} - \frac{\text{ع}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}\right)^{\frac{\text{٣}}{\text{٢}}}}$$

$$= \frac{\text{ك} \cdot \frac{\text{ء ع}}{\text{ء ن}}}{\left(\text{١} - \frac{\text{ع}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}\right)^{\frac{\text{٣}}{\text{٢}}}} = \text{ق}$$

$$\therefore \frac{\text{ك ص}^{\text{٢}}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ع}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}}} = \int \text{ق . ء س} = \text{الشغل}$$

وعلى ذلك يكون :

$$\frac{\text{ك ص}^{\text{٢}}}{\sqrt{\text{١} - \frac{\text{ع}^{\text{٢}}}{\text{ص}^{\text{٢}}}}} = \text{الطاقة} \quad \cdots \quad \cdots \quad (\text{٥٣})$$

وبمقارنة المعادلة (٥٣) بالمعادلة (٥٢) يتضح أن الطاقة متناسبة مع الكتلة وأن معامل التناسب هو $\text{ص}^{\text{٢}}$.

ولحساب الطاقة المدخرة في جرام واحد من المادة نضع في المعادلة (٥٣) .

$\text{ك} = \text{١}$ ، $\text{ع} = \text{صفر}$ فتكون :

الطاقة = ص^{2} = ٩ × ١٠^{٢٠} إرج = ٩ × ١٠^{١٣} جول = ٢٫٥ × ١٠^{٧} كيلووات ساعة ، ويلاحظ أن الكمية :

$$\text{ك}\,\text{ص}^{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}}}-1\right]$$

تعبر عن طاقة الحركة . إذ أن :

$$\text{ك}\,\text{ص}^{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}}}-1\right]=\text{ك}\,\text{ص}^{2}\left[\left(1+\tfrac{1}{2}\cdot\frac{\text{ع}^{2}}{\text{ص}^{2}}+\tfrac{3}{8}\cdot\frac{\text{ع}^{4}}{\text{ص}^{4}}+\cdots\right)-1\right]$$

$$=\tfrac{1}{2}\,\text{ك}\,\text{ع}^{2}+\cdots$$

$$=\tfrac{1}{2}\,\text{ك}\,\text{ع}^{2}\quad \text{تقريباً}$$

وبذلك تكون طاقة الحركة الكلاسيكية تقريباً أولا لطاقة الحركة في النظرية النسبية الخاصة .

المراجع

(أولا) المراجع التى يرجع إليها فى مطالعة هذا الكتاب .

A. S. Eddington : Space Time and Gravitation
Chapters I, II and III. Pages 1 — 62
Cambridge University Press (1921).

O. W. Richardson : The Electron Theory of Matter
Chapter XIII. Pages 268 — 284
and Chap. XIV. Pages 296 — 325
Cambridge University Press (1916).

A. Einstein & others : The Principle of Relativity Pages. 37 — 95
Methuen & Co. London (1923).

Houston. R. A. : A Treatise on Light
Chap. XXVI Pages 457 — 466
Longmans Green & Son. (1919).

(ثانيا) المراجع التى يُشار على القارئ بالرجوع إليها إذا أراد زيادة الإطلاع فى موضوع النسبية .

A. S. Eddington : The Mathematical Theory of Relativity
Cambridge University Press (1924).

H. Weyl : Space Time Matter
(English Translation By H. L. Brose)
Methuen & Co. (London) (1922).